

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

Evaluation de la sécurité du trafic par microsimulation

Bewertung der Verkehrssicherheit mit
Mikrosimulierung

Evaluation of traffic safety using
microsimulation

**Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)**

**Prof. A.-G. Dumont
F. Huguenin, ing. civile dipl. EPF**

Mandat de recherche ASTRA 2003/005

Décembre 2005

AVANT-PROPOS

Née sous l'impulsion du Dr Alexandre Torday, la présente recherche, menée au Laboratoire des voies de circulation (LAVOC - EPFL), part de l'idée que les microsimulateurs, développés pour permettre une meilleure gestion du trafic, peuvent être avantageusement utilisés à des fins d'amélioration de la sécurité routière en fournissant un indicateur de sécurité ou plutôt d'insécurité.

RESUME

Actuellement, les analyses de sécurité des réseaux routiers sont essentiellement « réactives », s'efforçant de localiser des points noirs à partir de relevés d'accidents. La présente étude propose de mener des analyses de sécurité « actives » en déterminant un indicateur de sécurité issu de la microsimulation des flux de circulation.

Limitée à la problématique des accidents en file, la présente recherche propose un nouvel indicateur de sécurité : la **densité d'insécurité UD** (pour Unsafety Density).

Dans la microsimulation, des modèles de comportement gouvernent la progression des véhicules, en interdisant toute collision. Le paramètre UD proposé se base sur le concept d'une hypothétique collision survenant entre deux véhicules se suivant, en prenant en compte aussi bien la probabilité que la gravité de l'accident.

Une étude de cas sur une portion autoroutière fournit des résultats encourageants, démontrant les potentialités de la microsimulation pour l'évaluation de la sécurité routière. Des zones présentant une dangerosité plus importante que le reste du réseau peuvent ainsi être localisées en fonction des conditions de trafic.

En complément aux indicateurs classiques de performance, la densité d'insécurité permet une analyse globale, fournissant une aide précieuse lors de la gestion, mais aussi de la conception de réseaux routiers.

Mots clés : densité d'insécurité, sécurité active, indicateur de sécurité, microsimulation

ZUSAMMENFASSUNG

Zurzeit, die Analysen der Sicherheit der Straßennetze werden in erster Linie "reaktiv", den man sich bemüht, schwarze Punkte anhand Unfallauszügen zu lokalisieren. Diese Studie schlägt vor, "aktive" Sicherheitsanalysen zu führen, indem sie einen Sicherheitsindikator bestimmt, der aus der Microsimulation der Verkehrsflüsse stammt.

Begrenzt auf die Problematik der Unfälle in Reihe, diese Forschung schlägt einen neuen Sicherheitsindikator vor: die **Unsicherheitsdichte UD** (Unsafety Density in English).

Im Microsimulation, Verhaltensmodelle regieren die Fahrt der Fahrzeuge, indem man jeden Unfall verbietet. Der vorgeschlagene UD-Parameter basiert sich auf dem Konzept eines hypothetischen Unfall, der zwischen zwei folgenden Fahrzeugen vorkommt, indem man sowohl die Wahrscheinlichkeit als auch die Schwere des Unfalles berücksichtigt.

Eine Fallstudie über eine Autobahnstrecke liefert ermutigende Ergebnisse, sie beweist die Möglichkeiten der Microsimulation für die Bewertung der Verkehrssicherheit. Zonen, die eine grössere Gefährlichkeit als der Rest des Netzes vorstellen können so gemäß den Verkehrsbedingungen lokalisiert werden.

In Ergänzung zu den klassischen Leistungsindikatoren, die Unsicherheitsdichte erlaubt eine globale Analyse, liefert eine wertvolle Hilfe bei der Management, aber auch für den Straßennetzenkonzeption.

Stichwörter: Unsicherheitsdichte, aktive Sicherheit, Sicherheitsindikator, Microsimulation

ABSTRACT

Currently, road safety analyses and audits are « reactive », in the sense where they are mainly relying on the detection of blackspots based on accidents statements. The present study is the fruit of a reflection leaving the idea that traffic microsimulators could be advantageously used in purposes of « anticipative » road safety, if it was able to offer safety indicators in addition to performance ones.

Limited to the problem of in line accidents, the present research purposes a new safety indicator : the unsafety density UD.

In microsimulation, behavioural models govern vehicles progress, by preventing any collision. The UD parameter so bases itself on the concept of an hypothetical collision arising between two consecutive vehicles, by taking into account as well the probability as the gravity of the accident.

A case study on a motorway section gives encouraging results, demonstrating the potentialities of microsimulation for road safety evaluation. So zones presenting dangerousness more important than the rest of the network can be localized, according to traffic conditions.

Added to classic performance indicators, the unsafety density allows a global analysis, supplying a precious help during road network management and conception.

Keywords : unsafety density, anticipative safety, safety indicator, microsimulation

TABLE DES MATIERES

1	CONTEXTE.....	1
1.1	LA MICROSIMULATION AU SERVICE DE LA SECURITE	2
1.2	OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	4
2	ETAT DES CONNAISSANCES.....	5
2.1	INDICATEURS DE SECURITE	5
2.1.1	Time to collision (TTC) [27]	6
2.1.2	Possibly Index for Collision with Urgent Deceleration (PICUD) [44]	7
2.1.3	Potential Time to Collision (PTTC) [49]	7
2.2	LACUNES DES INDICATEURS DE SECURITE ACTUELS	8
3	DEVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR DE SECURITE.....	9
3.1	CONCEPT GENERAL	9
3.1.1	Problématique de la microsimulation pour l'évaluation de l'insécurité	9
3.1.2	Scénario d'une hypothétique collision	10
3.2	DEFINITION DE LA DENSITE D'INSECURITE	11
3.3	INTRODUCTION DU PARAMETRE DANS UN MICROSIMULATEUR	13
3.3.1	Démarche de calcul de la densité d'insécurité	13
4	ETUDE DE CAS	17
4.1	DONNEES DE BASE POUR LA VALIDATION DE L'INDICATEUR	18
4.1.1	Zone d'étude	18
4.1.2	Référence temporelle des statistiques d'accidents.....	19
5	LA DENSITE D'INSECURITE	22
5.1	ETUDE PARAMETRIQUE.....	22
5.1.1	Variation du paramètre R_d	22
5.1.2	Variation des paramètres ΔS et S	23
5.1.3	Variation de la densité d'insécurité UD	24
5.2	VARIABILITE DE LA DENSITE D'INSECURITE.....	25
6	VALIDATION DE LA DENSITE D'INSECURITE	33
6.1	DENSITE D'INSECURITE ET POINTS NOIRS	35
7	RECOMMANDATIONS ET LIMITES DE L'EVALUATION DE LA SECURITE DU TRAFIC PAR MICROSIMULATION.....	38
7.1	LIMITATIONS DU PARAMETRE UD	38
7.2	PROBLEMES SOULEVES	39
7.2.1	Problématique de la modélisation du comportement de l'utilisateur.....	39
7.2.2	Problématique de l'étude de cas	41
7.3	PERSPECTIVES.....	44
8	CONCLUSIONS.....	45
9	ANNEXES.....	47
10	LISTE DES FIGURES.....	78
11	LISTE DES TABLEAUX.....	80
12	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	81

1 CONTEXTE

Les problèmes de sécurité dans les transports, en particulier dans le domaine routier, sont, aujourd'hui plus que jamais, devenus une préoccupation majeure des usagers et des gestionnaires de réseau. Au niveau suisse, la politique fédérale de sécurité routière (rapport VESIPO : Verkehrsicherheit Politik) en est un exemple flagrant, notamment par sa « vision zéro » qui vise un accroissement important de la sécurité routière à court, moyen et long terme [9]. Pour y parvenir, un ensemble d'actions sont envisageables et envisagées, qu'il s'agisse de mesures prises au niveau des véhicules, au niveau des usagers ou encore au niveau de l'infrastructure routière. Dans tous les cas, le but recherché est le maintien des performances globales des systèmes de transport, tout en garantissant une meilleure sécurité routière. Pour ce faire, une approche systémique de la problématique de la sécurité routière est nécessaire, considérant autant bien les caractéristiques des véhicules et des voies de circulation que le comportement des usagers. Or, au niveau suisse, des mesures directes ne peuvent pas être entreprises sur les performances des véhicules et le comportement des usagers, si ce n'est par exemple par la mise en place d'un système de répression plus strict ou la modification de lois existantes à l'exemple de la baisse du taux d'alcoolémie acceptable de 0.8 à 0.5 pour mille. Il en est différemment au niveau de l'infrastructure routière dont la sécurité peut être améliorée par diverses interventions humaines directes et concrètes.

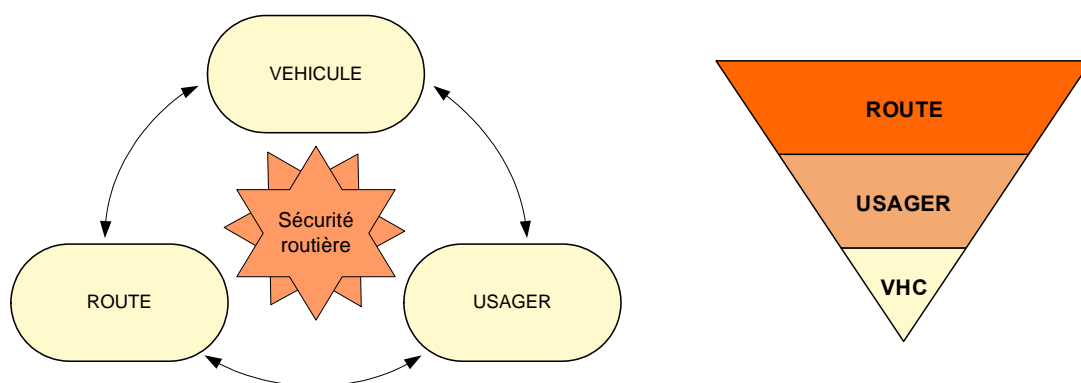


Figure 1 : L'approche systémique et les possibilités d'actions concrètes pouvant être entreprises au niveau suisse en matière de sécurité routière

A l'heure actuelle, les analyses de sécurité des réseaux routiers se basent principalement sur des relevés d'accidents. Ces statistiques permettent de déterminer les points noirs, endroits du réseau considérés comme les plus dangereux et qui seront assainis en premiers lieux. Les performances en terme de sécurité d'un nouvel aménagement ou d'un nouveau scénario de gestion de trafic ne peuvent quant à elles pas être évaluées directement. Dans ce cas, les seules indications disponibles proviennent d'enseignements tirés d'expériences antérieures réalisées dans des conditions similaires.

Pour être efficaces et efficientes, les **analyses de sécurité** devraient être « **actives** » plutôt que « **réactives** » face à un trop grand nombre d'accidents recensés dépassant un certain seuil de tolérance. Pour ce faire, de nouveaux outils sont nécessaires : il s'agit d'être capable de détecter des endroits, voire des conditions de circulation, dangereux au niveau de la sécurité routière, cela par un autre moyen que les statistiques d'accidents. Pour ce faire, l'emploi d'un **indicateur de sécurité et de la microsimulation**, instrument jusqu'alors utilisé à des fins d'amélioration et d'optimisation de l'utilisation des réseaux, semble être une solution adéquate.

1.1 LA MICROSIMULATION AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ

De manière générale, les modèles de microsimulation sont des modèles informatiques qui traitent l'information sur le comportement d'une entité. Ces modèles permettent alors de simuler d'importantes populations représentatives de ces entités de bas niveau, afin de permettre de tirer des conclusions qui s'appliquent à un niveau d'agrégation supérieur.

Une des entités pouvant être étudiée grâce aux modèles de microsimulation est le véhicule motorisé, dont le trafic représente le niveau d'agrégation supérieur. Une fois le trafic généré, les véhicules évoluent dans le système en suivant plusieurs modèles de comportement tels que :

- *le modèle de vitesse sur un tronçon* qui calcule la vitesse de roulement des véhicules en fonction de la vitesse maximale souhaitée, de la vitesse tolérée et de la vitesse permise
- *le modèle de poursuite* qui définit le comportement d'un conducteur en fonction de celui de ses prédécesseurs, principalement celui du conducteur du véhicule de tête
- *le modèle de changement de voie* qui identifie selon les conditions de circulation environnantes, quand un changement de voie peut ou doit s'effectuer
- *le modèle de manœuvre de dépassement* qui détermine si un dépassement est souhaitable ou non et, dans l'affirmative, s'assure qu'il est réalisable
- *le modèle d'entrée sur autoroute (convergence dans une bretelle d'entrée)* qui contrôle l'insertion des véhicules sur une autoroute et *le modèle de divergence vers une bretelle de sortie* qui contrôle la sortie des véhicules d'une autoroute vers une bretelle
- *le modèle d'acceptation de créneau* qui détermine la priorité d'arrêt ou de cédez à accorder entre deux véhicules qui se dirigent simultanément vers une même intersection par des approches différentes. Cette priorité est établie en fonction de la position et de la vitesse relative de chacun des véhicules

Tous ces modèles interagissent entre eux afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement des conducteurs et de leur véhicule dans des situations d'écoulement libre, de congestion (file d'attente) ou dans toutes situations intermédiaires. Les outils de microsimulation permettent ainsi d'avoir une vue globale et en accélérée des conditions de trafic. Ils permettent alors d'intégrer et de modéliser la plupart des systèmes de gestion de trafic et de télématique. Ils offrent la possibilité d'évaluer la performance de ces systèmes de manière dynamique efficace, cela sans devoir recourir aux résultats d'expériences similaires déjà réalisées. Néanmoins, et bien que de plus en plus utilisés dans la pratique, ces outils de simulation microscopique offrent certaines limites dans le domaine de l'analyse de sécurité.

Le concept même de la microsimulation du trafic permet donc de connaître en tout temps la position, la vitesse et l'accélération (positive ou négative) de tous les véhicules présents sur un réseau modélisé. Les données provenant de senseurs virtuels placés sur le réseau fournissent des données qui, appliquées sur des modèles empiriques ou analytiques, permettent d'obtenir certaines tendances au niveau des risques d'accidents. Le niveau de sécurité du système peut donc être évalué, comme démontré dans [36] et [37], mais de manière limitée. Cette approche comporte toutefois certains risques liés au fait que les modèles de comportement des véhicules sont basés sur une série d'hypothèses simplificatrices, rendant notamment impossible l'occurrence d'un accident sur le réseau. Le modèle de poursuite utilisé par les microsimulateurs génère en effet les véhicules de telle manière qu'aucune collision ne soit possible entre eux. En se basant uniquement sur des indicateurs de performance tels que les temps de parcours, on peut donc conclure faussement qu'un scénario est plus performant qu'un autre. Or, si le premier scénario présente un niveau de sécurité plus faible que le second, cela se traduit dans la réalité par une augmentation du nombre d'accidents. La présence d'accidents crée alors des congestions qui, par relation de causes à effets, provoquent une diminution de la performance du réseau. L'hypothétique gain en temps de parcours calculé grâce à la microsimulation ne correspond alors pas à la réalité du terrain.

Cet exemple démontre l'important lien existant entre l'évaluation de la sécurité et l'évaluation de la performance, la première ayant une forte influence sur la seconde, dénotant ainsi les limitations d'une analyse de sécurité basée uniquement sur des indicateurs de performance. Or, la réalisation d'audits de sécurité sur les nouveaux projets ou sur les infrastructures en service exige l'évaluation pertinente du niveau de sécurité de chaque tronçon de route. Le développement de nouvelles méthodes pour affiner cette évaluation est donc nécessaire si l'on veut permettre aux bureaux d'études chargés des audits de sécurité d'employer efficacement la microsimulation. Il s'agit d'exploiter au mieux les potentialités d'un outil développé initialement à des fins de gestion du trafic et dont l'emploi est de plus en plus courant pour traiter des réseaux se complexifiant sans cesse.

La microsimulation apporte une palette de données qui semblent adéquates pour calculer un voire plusieurs **indicateurs de sécurité**. Idéalement intégrés avec les outputs de performance, ils permettraient une évaluation de la qualité des réseaux qui soit globale dans le sens où les aspects de sécurité ne seraient pas laissés de côté mais feraient partie intégrante de l'analyse de la performance du réseau (Figure 2).

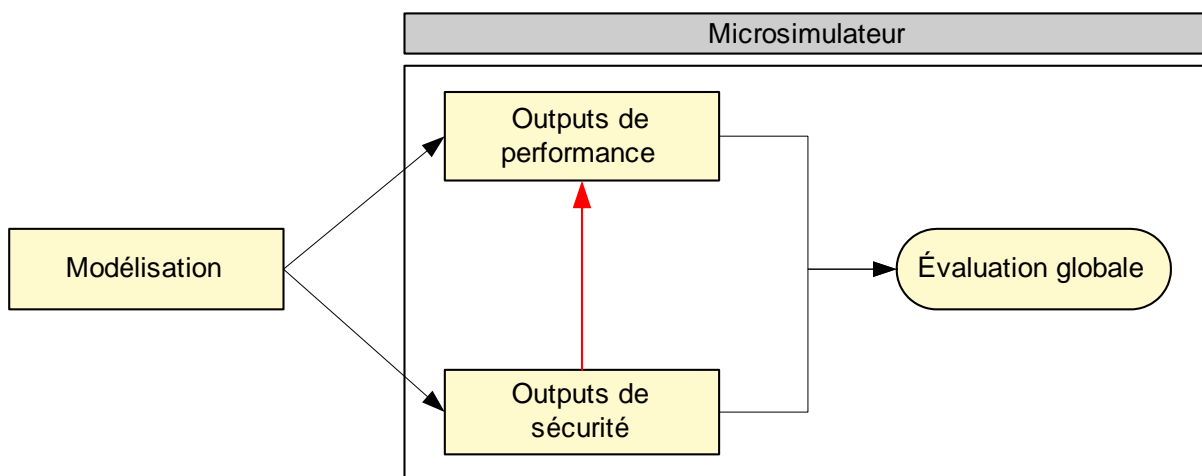


Figure 2 : Fonctionnement idéal d'un microsimulateur, avec influence des outputs de sécurité sur les outputs de performance pour une évaluation globale du réseau

Avec un tel fonctionnement, l'influence du niveau de sécurité du réseau sur la performance de celui-ci serait pris en compte et la microsimulation fournirait une évaluation globale du réseau, réduisant le risque d'une mauvaise interprétation des résultats, voire d'une non correspondance entre ces résultats et la réalité. De tels indicateurs de sécurité permettraient alors une analyse de sécurité préventive, capable de relever les conditions de trafic dangereuses et offrant une aide précieuse aux ingénieurs chargés de la conception des infrastructures et de leur exploitation.

1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Ce travail de recherche se veut une première étape vers l'analyse de sécurité par microsimulation. Son but n'est ainsi pas de développer un microsimulateur « idéal » comme décrit à la [Figure 2](#), mais plutôt de jeter les premières pierres d'une approche complémentaire au fonctionnement actuel des microsimulateurs qui fournit uniquement des indicateurs de performance, comme présenté à la [Figure 3](#).

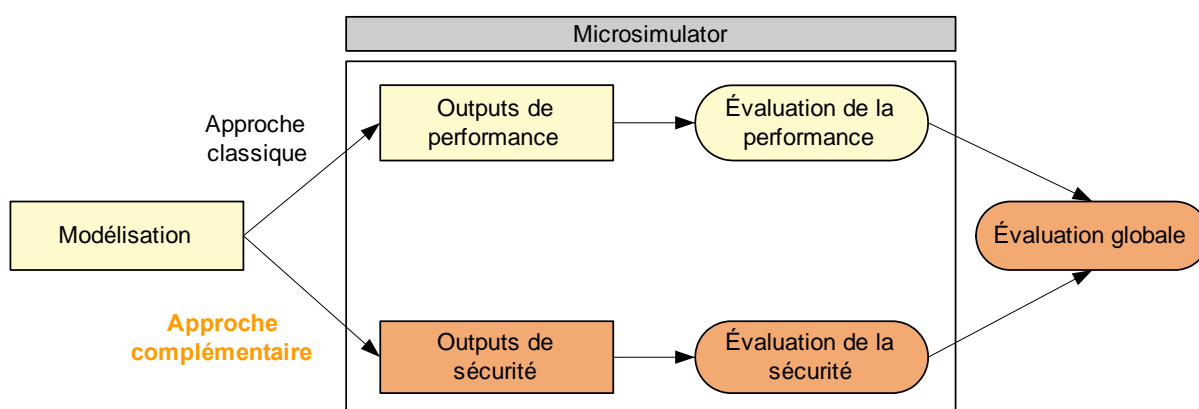


Figure 3 : Approche complémentaire par microsimulation permettant une évaluation de la sécurité

L'objectif général de ce travail de recherche est donc de développer un indicateur de sécurité évalué par microsimulation et capable d'apprécier, dans certaines conditions restrictives, le niveau de sécurité (ou d'insécurité) d'un réseau routier, en fonction des conditions de trafic en présence. Différents scénarii de gestion du trafic ou systèmes télématiques pourront ainsi être comparés en terme de performance, mais aussi en terme de sécurité routière.

Le champ d'application de l'indicateur de sécurité développé ici est limité. Il se borne uniquement à la **problématique des accidents en file**, soit les collisions par l'arrière en voie courante. Les problématiques des accidents aux intersections, de collisions latérales et ceux faisant intervenir des piétons ou des cycles ne sont pas abordées.

Remarque : l'analyse proposée ici peut paraître surprenante. Tenter de localiser des accidents, événements qui par définition sont imprévisibles, peut en effet paraître irréaliste. Néanmoins, l'expérience montre que, selon les conditions de trafic et la géométrie de la route, la propension aux accidents est plus élevée. Les corrections de tracé et le réaménagement des abords routiers permet d'éradiquer une partie de ces accidents, mais ceux imputables aux conditions de trafic persistent.

A terme, l'idée du nouvel indicateur de sécurité est de permettre, selon les conditions de circulation, d'informer les usagers de conditions dangereuses voire de prendre des mesures notamment au niveau de la signalisation pour réduire cette dangerosité. La technique d'analyse des réseaux routiers ne se bornerait plus alors à une démarche réactive, mais deviendrait active, dans le sens où des mesures concrètes pourraient être envisagées avant même d'observer un nombre élevé d'accidents.

2 ETAT DES CONNAISSANCES

A ce jour, l'utilisation de la microsimulation pour l'évaluation de la sécurité routière est encore peu répandue dans la pratique, l'outil de microsimulation ayant été développé avant tout à des fins de gestion, d'analyse et d'optimisation des conditions de circulation. Néanmoins, le nombre de travaux de recherche ayant pour but le développement d'indicateurs de sécurité est en évolution, ce depuis le début des années 2000, période à laquelle le potentiel de la microsimulation pour l'évaluation de la sécurité a été mis en avant [1].

« The idea of using micro-simulation modelling for road traffic safety assessment is still a controversial issue in the traffic research community. A recent investigation sponsored by the European Union's 4th Framework Program revealed that there is an implicit and substantiated need for the development of micro-simulation systems designed for the assessment of traffic safety »

Archer J., «Developing the potential of micro-simulation modelling for traffic safety assessment», [1]

La potentialité de la microsimulation pour l'analyse de sécurité est démontrée. Reste à présent à définir un indicateur de sécurité adéquat pour y être intégré.

2.1 INDICATEURS DE SÉCURITÉ

Un nombre important d'indicateurs de sécurité est présent dans la littérature, dont certains plus ou moins compatibles avec les possibilités offertes par la microsimulation. En ne considérant que les collisions en files, on peut par exemple citer les indicateurs suivants : Headway distribution, Time to collision (TTC), Number of shock waves (Van Arem et al., 1997), Severity of shock waves, Time to accident (TTA), Post-enroachment time (PET), Deceleration to safety time (DTS, Topp et al., 1996), Time exposed time to collision indicator (TET), Time integrated time to collision indicator (TIT), Gap time, Initial deceleration rate (DR), Estimating incident probability (EIP, [28]).

Sans aucune ambition d'exhaustivité, la suite de ce chapitre permet un rapide tour d'horizon du fonctionnement des principaux indicateurs de sécurité en file. Il permet de présenter le mode de fonctionnement de certains indicateurs de sécurité, afin de déceler leurs principaux manquements et défauts pour une évaluation de la sécurité routière par microsimulation.

2.1.1 Time to collision (TTC) [27]

Introduit en 1971 par le chercheur américain Hayward, la notion de Time to collision (TTC) s'applique dans le cas d'une hypothétique collision entre deux véhicules se suivant. Sa valeur à un instant t donné représente le temps supposé restant avant la collision entre ces deux véhicules si ceux-ci conservent leur vitesse et ne changent pas de voie. Le TTC d'une combinaison d'un véhicule i avec un véhicule de tête $(i-1)$ à un instant t se calcule comme suit :

$$\text{TTC}_i = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_i}{\dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i-1}(t)} \text{ [s]} \quad \forall \dot{X}_i(t) > \dot{X}_{i-1}(t) \quad (\text{Équation 1})$$

Avec

\dot{X}_i [m/s] : la vitesse du véhicule i au temps t
 X_i [m] : la position du véhicule i au temps t
 l_i [m] : la longueur du véhicule i

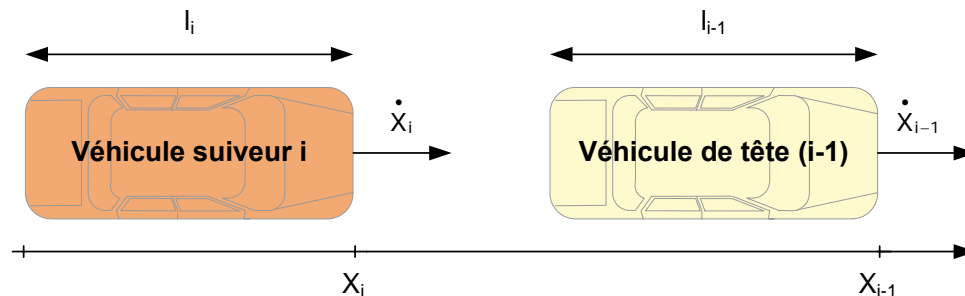


Figure 4 : Schéma du couple de véhicule intervenant dans la définition des collisions en file

En accord avec l'expression exprimée ci-dessus, une valeur de TTC ne peut être calculée que lors d'une différence de vitesse positive entre deux véhicules. Ainsi, dans le cas où le véhicule de tête $(i-1)$ freine, la notion de Time to collision s'illustre de la manière suivante :

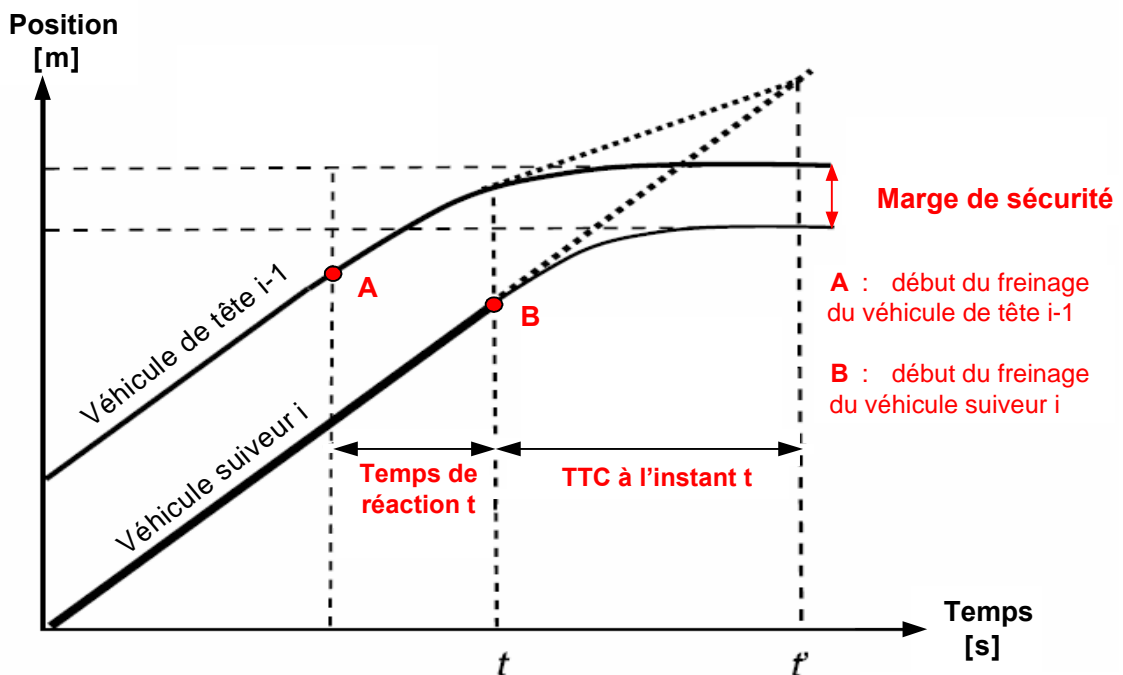


Figure 5 : Illustration de la notion de Time to collision par la trajectoire des véhicules [27]

Après un temps de réaction t , le véhicule suiveur i commence sa manœuvre de freinage. Le TTC à cet instant t donné se calcule en présumant que la différence de vitesse des véhicules au temps t reste constante jusqu'au temps t' , l'instant de l'hypothétique collision. Ainsi, plus la valeur de TTC est élevée, plus la situation est sûre vis-à-vis d'un hypothétique choc par l'arrière.

Plusieurs indicateurs dérivé du TTC existent, notamment le Time Exposed Time-to-collision (TET) et le Time Integrate Time-to-collision (TIT).

Le TET représente la sommation de tous les moments d'une période H considérée où un conducteur approche le véhicule le précédent avec une valeur de TTC en dessous d'un seuil TTC^* défini comme la valeur limite entre une approche sécuritaire et une approche critique. Plus sa valeur est basse, plus la situation est sécuritaire. Cet indicateur de sécurité est valable en moyenne sur une période H et ne tient pas compte de la variation des niveaux de sécurité des différentes valeurs du TTC en dessous de la valeur seuil.

L'indicateur TIT a donc été développé, pour prendre en considération l'impact de la valeur du TTC en matière de sécurité. Le TIT exprime, en terme de seconde au carré, le niveau de sécurité obtenu après intégration du profil du TTC des conducteurs. Une valeur de TIT élevée signifie un grand temps d'exposition à des valeurs de TTC risquées, négatives pour la sécurité routière.

2.1.2 Possibly Index for Collision with Urgent Deceleration (PICUD) [44]

En supposant que l'on soit dans le cas où deux véhicules se suivent, que le premier freine brusquement alors que le deuxième ne décélère qu'après un certain temps de réaction, le PICUD représente alors la distance restante entre les véhicules arrêtés. Cet indicateur s'exprime de la manière suivante :

$$PICUD = \frac{V_1^2}{-2 \cdot \alpha} + s_0 - \left(V_2 \cdot \Delta t + \frac{V_2^2}{-2 \cdot \alpha} \right) [m] \quad (\text{Équation 2})$$

Avec :

PICUD [m] : indicateur de collision potentielle en cas de freinage d'urgence

V_1 [m/s] : vitesse du véhicule de tête juste avant le début de son freinage

V_2 [m/s] : vitesse du véhicule suiveur juste avant le début du freinage du véhicule de tête

S_0 [m] : distance entre les deux véhicule avant le début du freinage du véhicule de tête

Δt [s] : temps de réaction du véhicule suiveur

α [m/s²] : décélération des véhicules, par hypothèse $\alpha = -3.3$ [m/s²]

Le PICUD rend compte des conditions entre deux véhicules, mais ne permet pas de disposer directement d'une évaluation de la sécurité sur un tronçon de route. Pour ce faire, une distribution des fréquences cumulées peut être utilisée. Malgré cela, cet indicateur est plus efficace que l'indicateur Time-to-collision pour traiter les cas où la distance ou la différence de vitesse entre deux véhicules est petite. Dans une telle situation, le TTC ne relève en effet aucun danger, alors que la situation peut l'être pour les conducteurs.

2.1.3 Potential Time to Collision (PTTC) [49]

En supposant que l'on soit dans la situation où deux véhicules se suivent, que le premier freine brusquement, le PTTC permet de déterminer à quel moment la collision se produira, dans le cas où le véhicule suiveur ne freine pas. Différent du TTC par sa prise en compte du freinage du véhicule de tête, le PPTC s'exprime par la relation suivante :

$$D = \Delta v \cdot PTTC + 0.5 \cdot \alpha \cdot PTTC^2 [m] \quad (\text{Équation 3})$$

Avec

PTTC [s] : temps avant collision potentielle

D [m] : distance entre deux véhicules se suivant

Δv [m/s] : différence de vitesse entre deux véhicules se suivant

α [m/s²] : décélération

2.2 LACUNES DES INDICATEURS DE SÉCURITÉ ACTUELS

Dans la majeure partie des indicateurs actuels, la sécurité en file est exprimée en terme de distance, voire de temps jusqu'à une hypothétique collision. Plus cette distance (voire ce temps) est proche de zéro, plus l'occurrence d'un accident est grande. Ces indicateurs sont ainsi à considérer comme indicateurs de « probabilité d'accidents », plus que comme indicateurs de sécurité, la notion de sévérité d'accident n'étant pas explicitée directement.

Or, l'évaluation de la gravité des accidents est un élément indissociable de la sécurité routière, les conséquences pouvant être dramatiques ou au contraire insignifiantes selon la force de l'impact.

Le développement d'un nouvel indicateur de sécurité vise donc à combler ces lacunes en offrant un paramètre capable de prendre en compte la probabilité mais aussi la sévérité d'accident.

3 DÉVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR DE SÉCURITÉ

Visant au but ultime de permettre une analyse de sécurité « active », le nouvel indicateur de sécurité, associé à un microsimulateur, doit permettre de renseigner sur la « **dangerosité** » **d'un réseau routier**. Au travers de ce nouvel indicateur, il s'agit de pouvoir qualifier l'insécurité d'une situation de trafic donnée.

3.1 CONCEPT GÉNÉRAL

Le concept général du nouvel indicateur de sécurité est de qualifier l'insécurité routière en allant au-delà du seul critère du nombre d'accidents (graves ou mortels), donnée de base des actuelles analyses de sécurité [48]. L'idée est alors de se rapprocher des études de risque, en mettant en parallèle la sécurité routière avec la notion de risque. On peut de la sorte exprimer l'insécurité routière comme combinaison de deux éléments, qui sont :

- la probabilité d'un événement indésirable (ici un accident en file)
- la sévérité de celui-ci (l'étendue des dommages (au sens large) encourus)

On apporte ainsi une information supplémentaire au seul dénombrement d'accidents en pondérant ces accidents par leur sévérité. Le concept du nouvel indicateur de sécurité permet de ne pas se focaliser uniquement sur un temps ou une distance séparant deux véhicules susceptibles de se heurter, mais de considérer également les conséquences du choc.

3.1.1 Problématique de la microsimulation pour l'évaluation de l'insécurité

L'introduction du nouvel indicateur dans un microsimulateur implique de pouvoir évaluer la sévérité mais aussi la probabilité d'accidents d'une situation donnée. Or, les modèles de comportement utilisés dans la microsimulation excluent tout type de collision entre véhicules. Dans le cas particulier de conflits en section linéaire, le modèle de poursuite est responsable de l'absence de collision pouvant survenir entre deux véhicules se suivant.

Les différents logiciels de microsimulation disposent chacun de leurs propres modèles de comportement des véhicules. Néanmoins, ceux-ci sont généralement tous basés sur un paramètre commun, à savoir le temps de réaction.

Selon le logiciel, ce temps de réaction peut être un paramètre global applicable à l'ensemble des véhicules et de leurs conducteurs ou alors être propre à une certaine classe de véhicules. De plus, il peut être soit de nature déterministe, soit stochastique, c'est-à-dire suivre une certaine loi de distribution.

Dans tous les cas, le temps de réaction attribué à un véhicule reste constant durant l'entier de la simulation. Ainsi, le modèle de poursuite contrôle l'accélération, la décélération, et par conséquent la distance intervéhiculaire ¹, en fonction du temps de réaction du véhicule suiveur. Plus un véhicule présente un faible temps de réaction, plus sa distance intervéhiculaire acceptable est faible.

Si cette approche permet une excellente approximation des flux de trafic et de la position des véhicules, elle ne permet cependant pas de reproduire une situation réelle de collision potentielle. La principale raison en est que, dans la simulation, la distance intervéhiculaire n'est fonction que du temps de réaction de l'usager, supposé constant. Or, en réalité, ce temps de réaction n'est de loin pas constant tout au long d'un trajet. Dépendant de la concentration du conducteur, il est influencé par de multiples éléments tels que l'état de fatigue du conducteur, une discussion avec un passager, etc... Malgré cela, on peut prétendre que le modèle de comportement approxime les mouvements des véhicules avec une précision satisfaisante, les courbes caractéristiques utilisées lors de la calibration se rapprochant grandement de celles observées. Par conséquent, le temps de réaction obtenu représente donc bien la moyenne des temps de réaction des véhicules dans la réalité.

Cette simplification apparemment grossière ne fait que reprendre la notion de temps de réaction standard. Définie dans les différentes normes routières nationales, cette notion est largement utilisée lors des études de planification ou de conception géométrique. Au niveau suisse, cette valeur est fixée à 2 secondes et correspond à un temps de réaction psychologique et mécanique [11].

3.1.2 Scénario d'une hypothétique collision

Avec la notion de temps de réaction standard, le potentiel d'une collision devient significatif lorsque le temps intervéhiculaire se situe en dessous de cette valeur, dans le cas où les deux véhicules considérés circulent avec la même vitesse et disposent d'une même capacité de décélération (situation par ailleurs rarement rencontrée en réalité). Les modèles de poursuite utilisés dans les microsimulateurs génèrent les mouvements des véhicules les uns par rapport aux autres, en prenant en compte le temps de réaction ainsi que les performances des véhicules (capacité de freinage notamment), sans qu'il ne survienne jamais de collision.

Il semble ainsi, a priori, être impossible d'obtenir des renseignements sur la probabilité d'accidents à partir d'une microsimulation, celle-ci se comportant comme un « monde parfait » où aucun accident n'apparaîtra jamais. On parvient néanmoins à remédier à ce manquement en faisant appel à la **notion d'hypothétique collision** entre deux véhicules se suivant.

Cette « hypothétique collision » fait appel à deux hypothèses principales qui sont :

- un véhicule de tête décélérant avec sa capacité de freinage maximale
- un véhicule suiveur effectuant un freinage d'urgence, soit utilisant sa capacité de freinage maximale, après un certain temps de réaction égal au temps de réaction standard

Selon la distance séparant les deux véhicules au moment du freinage du véhicule de tête, arrive ou non une hypothétique collision. On peut ainsi obtenir, par la microsimulation, un renseignement sur la potentialité d'un hypothétique accident en file au travers du microsimulateur.

¹ La distance intervéhiculaire est définie comme la distance séparant l'arrière du véhicule de tête et l'avant du véhicule suiveur.

3.2 DÉFINITION DE LA DENSITÉ D'INSÉCURITÉ

Pour évaluer le risque d'insécurité, il est proposé ici de définir la **densité d'insécurité UD**. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un **paramètre d'insécurité U**, spécifique à chaque couple de véhicules (de tête et suiveur).

Le postulat que le risque d'accident en file s'exprime en terme de probabilité d'occurrence et de sévérité permet de définir le **paramètre d'insécurité**, comme suit :

$$U = fct(R_d, \Delta S, S) \quad (\text{Équation 4})$$

Avec :

$R_d = \frac{D_l}{D_{\max,f}}$ [-] : quotient entre la décélération réelle du véhicule de tête D_l et la décélération théorique maximale du véhicule suiveur $D_{\max,f}$

Le paramètre R_d renseigne sur l'occurrence d'une collision entre deux véhicules se suivant. La décélération réelle du véhicule de tête informe de la présence d'une situation à risque. La probabilité d'un choc est alors fonction de sa valeur D_l et de celle de la capacité de freinage du véhicule suiveur $D_{\max,f}$. Plus la décélération du véhicule de tête est importante et la capacité de freinage du véhicule suiveur petite, plus la probabilité d'un choc est importante.

ΔS [m/s] : différence de vitesse entre le véhicule de tête et le véhicule suiveur au moment de l'hypothétique collision

S [m/s] : vitesse du véhicule suiveur au moment de l'hypothétique collision

Le paramètre ΔS quantifie la vitesse de l'impact, alors que le paramètre S donne une indication sur les conséquences du choc. Globalement, ces deux paramètres renseignent alors sur la sévérité d'une hypothétique collision. La sévérité d'une collision survenant entre deux véhicules circulant à une faible vitesse quasiment identique est en effet moindre face à celle d'un choc survenant entre deux véhicules présentant des vitesses très différentes. De plus, la sévérité de cette collision sera d'autant plus importante si la vitesse du véhicule suiveur est élevée.

Faisant intervenir ces trois grandeurs, le paramètre d'insécurité peut ainsi se définir en première approche par une équation de base multiplicative dont l'expression et les coefficients pourront être précisés et affinés dans des études futures.

Ainsi, le paramètre d'insécurité U , qui relève le degré d'insécurité entre deux véhicules consécutifs sur un axe routier, à un moment t donné, peut être défini de la manière suivante :

$$U = R_d^\alpha \cdot \Delta S^\beta \cdot S^\gamma \quad [\text{m}^2/\text{s}^2] \quad (\text{Équation 5})$$

Avec :

R_d [-] : quotient entre la décélération réelle du véhicule de tête D_l et la décélération théorique maximale du véhicule suiveur $D_{\max,f}$

ΔS [m/s] : différence de vitesse entre le véhicule de tête et le véhicule suiveur au moment de l'hypothétique collision

S [m/s] : vitesse du véhicule suiveur au moment de l'hypothétique collision

α , β et γ [-] : coefficients

Le calcul de ce paramètre d'insécurité, valable pour un couple de véhicule et pour un pas de simulation, se réalise aisément à partir de la microsimulation. Celle-ci permet en effet de connaître en tout temps la position, la vitesse, l'accélération (négative ou positive) et la capacité maximale de freinage d'un véhicule déterminé et de celui qui le suit. Pour un couple de véhicule, il est ainsi possible de savoir, à chaque pas de temps, si le véhicule de tête effectue ou non un freinage. Si tel est le cas, en connaissant le temps de réaction du véhicule suiveur (un des paramètres de modélisation du véhicule) et en supposant que le véhicule de tête effectue un freinage d'urgence, il est possible de déterminer si une hypothétique collision survient ou non, selon que le véhicule suiveur, décélérant avec sa capacité de freinage maximale (freinage d'urgence), s'arrête ou non avant de percuter le véhicule de tête.

En cas de collision hypothétique, la vitesse S du véhicule suiveur et la différence de vitesse ΔS entre les deux véhicules au moment de l'impact peuvent être calculés, par simple application des lois de dynamique (Figure 6). La même démarche de calcul peut alors être répétée pour les pas de simulation suivant et pour d'autres couples de véhicules.

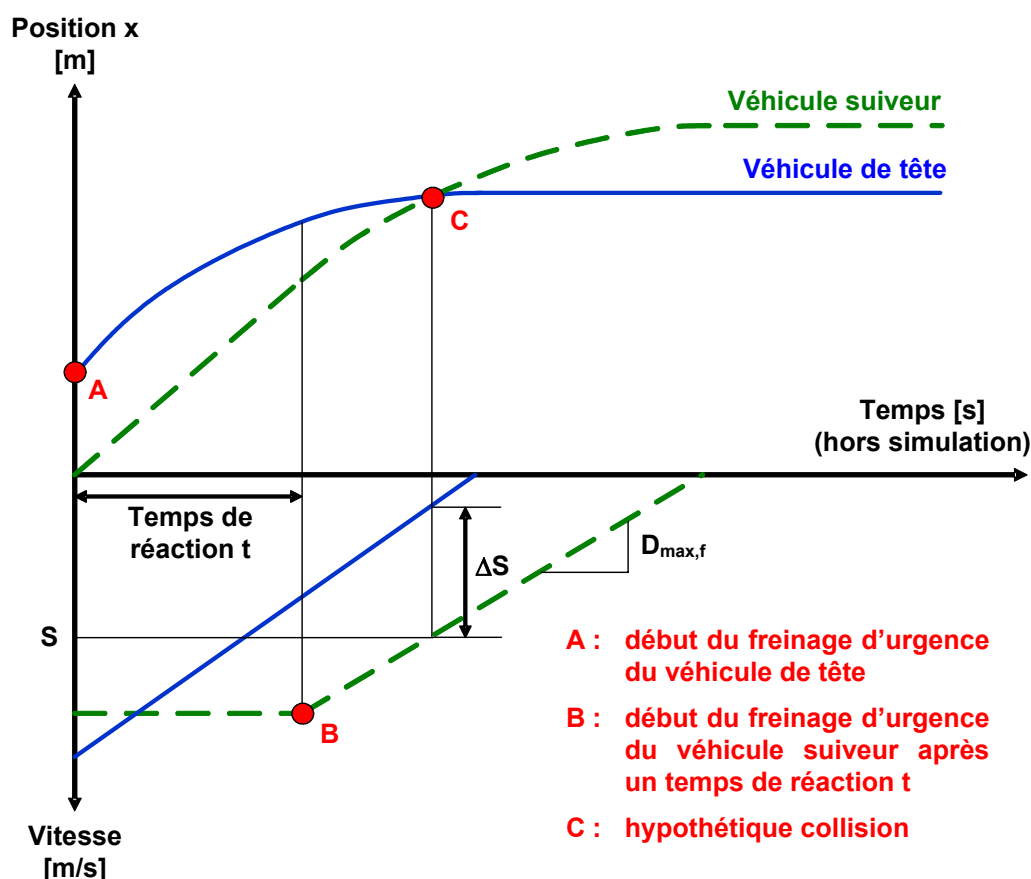


Figure 6 : Détermination de S et de ΔS dans le cas d'une hypothétique collision entre deux véhicules se suivant

Remarque : le terme d'hypothétique collision prend ici tout son sens puisqu'à aucun moment de la microsimulation, un impact entre deux véhicules ne peut survenir en raison du modèle de poursuite. Les paramètres S et ΔS ne proviennent donc pas de l'observation d'une collision dans la microsimulation, mais bien d'un scénario critique (Chapitre 3.1.2) dont le point de départ est le freinage du véhicule de tête au pas de simulation considéré. A partir des données fournies par la microsimulation à ce pas de simulation, on détermine les paramètres S et ΔS d'après le comportement des deux véhicules suivant les conditions du scénario d'hypothétique collision. L'abscisse temporelle considérée dans ce calcul (Figure 6) ne correspond donc pas au temps simulé.

Le paramètre d'insécurité ainsi calculé ne donne qu'une information locale sur l'insécurité d'une paire de véhicules, informant sur la probabilité d'occurrence et la gravité d'une hypothétique collision entre ces deux véhicules qui se suivent.

Pour disposer d'une vision globale de la sécurité en file d'un réseau routier, un paramètre de **densité d'insécurité** doit être déterminé, pour chaque segment du réseau modélisé et pour chaque période d'agrégation. Ainsi, un paramètre de densité d'insécurité peut s'exprimer de la manière suivante :

$$UD = \frac{\sum_{s=1}^{S_t} \sum_{v=1}^{V_t} U_{v,s} \cdot d}{T \cdot L} \quad [m/s^2] \quad (\text{Équation 6})$$

Avec :

UD [m/s²] : densité d'insécurité
 U_{v,s} [m²/s²] : paramètre d'insécurité du véhicule v au pas de simulation s
 V_t [-] : nombre de véhicules sur le segment
 S_t [-] : nombre de pas de simulation dans la période d'agrégation
 d [s] : durée du pas de simulation
 T [s] : durée de la période d'agrégation
 L [m] : longueur de la section

Comme mentionné précédemment, les valeurs de la densité d'insécurité UD, calculées à chaque période d'agrégation, sont qualitatives et ne doivent pas être traitées de manière quantitative. Elles permettent néanmoins de comparer les niveaux de sécurité de différents tronçons d'un réseau et d'observer leur évolution dans le temps. Elles permettent également une comparaison entre différents scénarii, étant par conséquent un outil performant pour l'appréciation du risque d'accident en file lors du processus d'évaluation de la sécurité.

3.3 INTRODUCTION DU PARAMÈTRE DANS UN MICROSIMULATEUR

Une fois le concept général du nouvel indicateur de sécurité défini, il s'agit de fixer les différents algorithmes nécessaires à son application dans un microsimulateur.

Dans le cas présent, l'outil de microsimulation utilisé est le logiciel Aimsun NG (Advanced Interactive Microscopic for Urban and Non-urban Networks). Celui-ci permet de modéliser les flots de trafic en représentant le réseau au niveau des voies de circulation et en simulant explicitement les mouvements des véhicules individuels en se basant sur des modèles de poursuite et de changement de voie principalement.

Cet outil informatique offre ainsi l'avantage de présenter toutes les caractéristiques nécessaires au développement du nouvel indicateur de sécurité, notamment la possibilité d'ajout d'applications dll.

Remarque : le choix du logiciel Aimsun NG ne résulte pas d'une analyse éliminatoire des possibilités de tous les logiciels de microsimulation présents sur le marché. Il s'avère simplement être compatible avec les objectifs de la présente étude, tout en étant connu et disponible au Laboratoire des voies de circulation (LAVOC - EPFL), car employé dans d'autres études liées à la microsimulation du trafic.

3.3.1 Démarche de calcul de la densité d'insécurité

La démarche générale de calcul de la densité d'insécurité se base sur les informations fournies par la microsimulation pour chaque paire de véhicules, à chaque pas de simulation. Selon la position et les caractéristiques (vitesse et accélération) de la paire de véhicules au pas de simulation observé, une situation d'hypothétique collision est présente ou non. Si tel est le cas, on procède alors au calcul proprement dit de la densité d'insécurité. Dans le cas contraire, on passe au pas de simulation suivant ou à une autre paire de véhicules.

Ainsi, la démarche synthétique de calcul de la densité d'insécurité, dont l'algorithme complet est donné à l'Annexe 1, est la suivante :

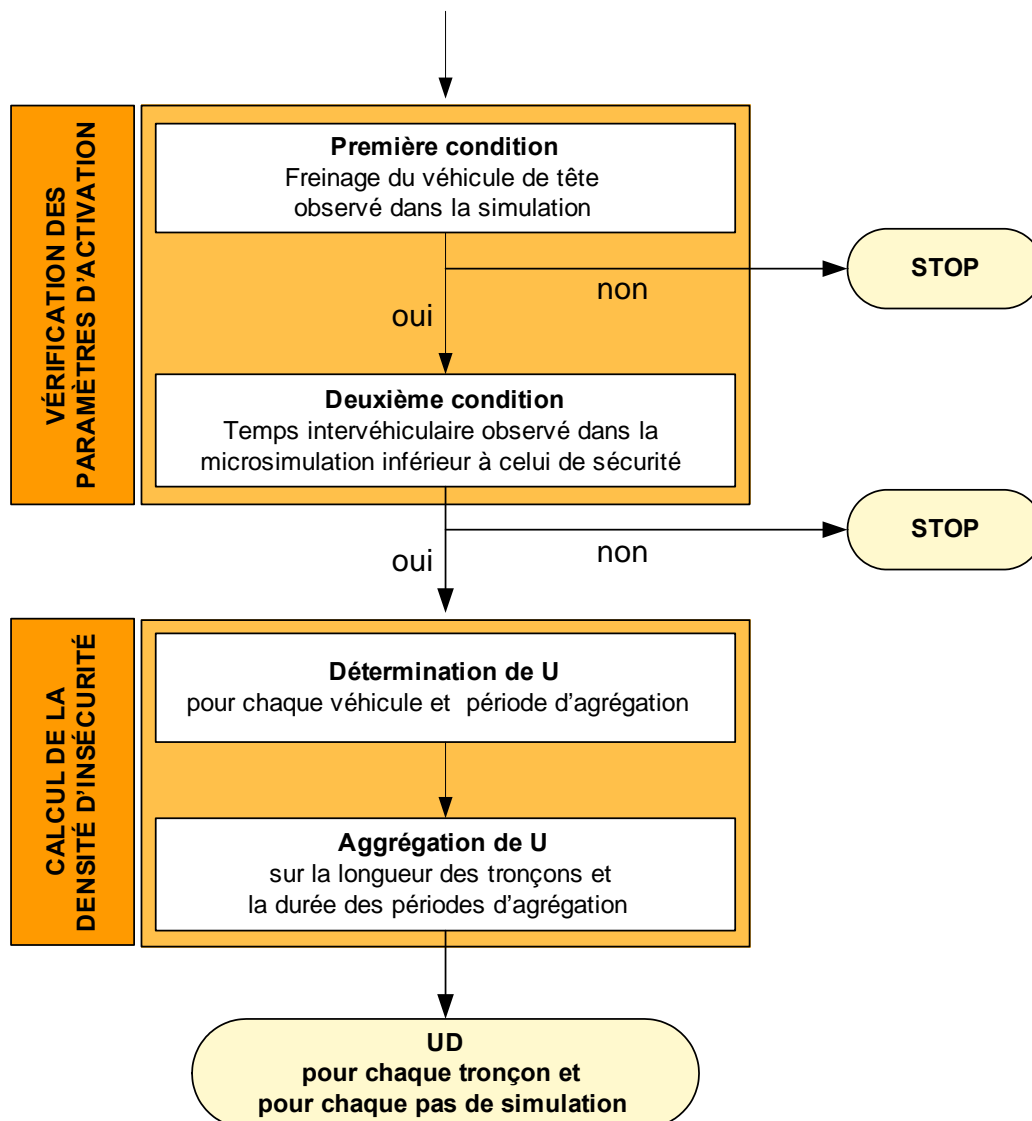


Figure 7 : Schématisation de la démarche de calcul de la densité d'insécurité à partir d'un microsimulateur

- 1) Vérification de la première condition d'activation pour le calcul du paramètre UD : freinage du véhicule de tête

A chaque pas de temps, la microsimulation fournit une « photographie » de l'état du réseau avec, pour chaque véhicule, une indication de ses caractéristiques (notamment sa position, sa vitesse et sa décélération). Or, selon la définition du paramètre de densité d'insécurité, une situation à risques entre deux véhicules se suivant se présente uniquement dans le cas où le véhicule de tête entame une manœuvre de freinage.

Il s'agit donc, pour chaque couple de véhicules se situant sur une même section, de contrôler si oui ou non le véhicule de tête a une accélération négative. Si tel est le cas, on passe au deuxième point de la démarche. Dans le cas contraire, le processus s'arrête ici pour ce pas de simulation et ce couple de véhicules.

- 2) Vérification de la seconde condition d'activation pour le calcul du paramètre UD : temps intervéhiculaire réel inférieur au temps intervéhiculaire de sécurité

La deuxième condition indiquant une situation potentiellement dangereuse est celle relative au temps (ou la distance) séparant un couple de véhicules. Dans le cas où cet intervalle de temps est inférieur à celui permettant une progression sécuritaire des véhicules quelque soit l'agissement d'un des deux, alors la situation est potentiellement dangereuse et le calcul du paramètre UD devient nécessaire.

L'intervalle de temps réel entre les véhicules est obtenu grâce aux données de sortie de la microsimulation qui indiquent la longueur des véhicules ainsi que leur vitesse et leur position à chaque instant.

Le temps de sécurité s'obtient en considérant la situation critique où, dans le cas d'un freinage d'urgence du véhicule de tête, le véhicule suiveur freine à son tour avec sa capacité de freinage maximale, cela après un certain temps de réaction. Il en résulte l'état critique où l'avant du véhicule suiveur touche l'arrière du véhicule de tête, alors que tous deux circulent à la même vitesse. Deux cas sont différenciés, selon que la vitesse des véhicules est nulle (les deux véhicules se touchent au moment précis où tous deux s'arrêtent) ou non (les deux véhicules se heurtent alors en ayant la même vitesse).

3) Calcul du paramètre d'insécurité U pour chaque véhicule et chaque pas de temps.

Le calcul du paramètre U nécessite la prise en compte de trois grandeurs, soit le quotient R_d entre la décélération réelle du véhicule de tête et la décélération maximale théorique du véhicule suiveur, la différence de vitesse ΔS entre les deux véhicules au moment du choc hypothétique et finalement, la vitesse S du véhicule suiveur au moment de l'hypothétique collision.

Le rapport entre les décélération se détermine simplement à partir des indications fournies à chaque pas de temps par la microsimulation. La détermination des vitesses nécessite quant à elle l'emploi des règles cinématiques et la différenciation de plusieurs scénarii de collision hypothétique, à savoir :

- Cas 1-1 : le véhicule suiveur entre en collision avec le véhicule de tête (en train de freiner mais encore en mouvement), avant d'avoir pu entamer son freinage
- Cas 2-1 : le véhicule suiveur entre en collision avec le véhicule de tête (en train de freiner mais encore en mouvement), alors qu'il freine
- Cas 3-1 : le véhicule suiveur entre en collision avec le véhicule de tête (entrain de freiner mais encore en mouvement), au moment où il achève sa manœuvre de freinage
- Cas 1-2 : le véhicule de tête a achevé sa manœuvre de freinage et le véhicule suiveur le percute sans avoir entamé sa manœuvre de freinage
- Cas 2-2 : le véhicule de tête a achevé sa manœuvre de freinage et le véhicule suiveur le percute malgré une manœuvre de freinage

Remarque : les différents scénarii considérés ne prennent pas en compte le cas où, après s'être arrêté, le véhicule de tête repart et qu'une collision survient avec le véhicule suiveur à ce moment là. Si aucun accident n'est survenu lors de la manœuvre de freinage du véhicule de tête, il est supposé que le véhicule suiveur adopte un comportement sécuritaire, selon les règles définies par le modèle de poursuite. Selon sa définition, le paramètre d'insécurité U n'est en effet valable que dans le cas d'un freinage du véhicule de tête.

Ces divers scénarii permettent de déterminer la vitesse du véhicule suiveur et la différence de vitesse entre la paire de véhicules, au moment du crash hypothétique. Combinés avec le rapport entre la décélération réelle du véhicule de tête, celle maximum théorique du véhicule suiveur et un temps de réaction du véhicule suiveur, ces éléments permettent de quantifier le paramètre d'insécurité, valable pour un couple de véhicules durant un pas de simulation.

4) Calcul de la densité d'insécurité UD

Par sommation pondérée des valeurs de U sur la longueur des tronçons et sur la période d'agrégation, on obtient finalement la densité d'insécurité UD sur chacune des sections formant le réseau et pour chaque période d'agrégation.

4 ETUDE DE CAS

L'étude de cas retenue pour l'évaluation de la qualité et de la validité de la densité d'insécurité doit correspondre au champ d'application du paramètre UD. Par conséquent, une portion autoroutière est particulièrement appropriée puisqu'il s'agit d'un tronçon en section courante sans intersection et sans interaction avec d'autres catégories d'utilisateurs tels que les deux-roues ou les piétons.

L'étude de cas retenue considère la chaussée Sud de l'autoroute Genève – Lausanne, entre les kilomètres km 57.00 et km 65.00. La portion de réseau étudiée comprend 2 entrées sur l'autoroute, soit la jonction Morges-Ouest et la jonction Morges-Est, comme montré ci-dessous :

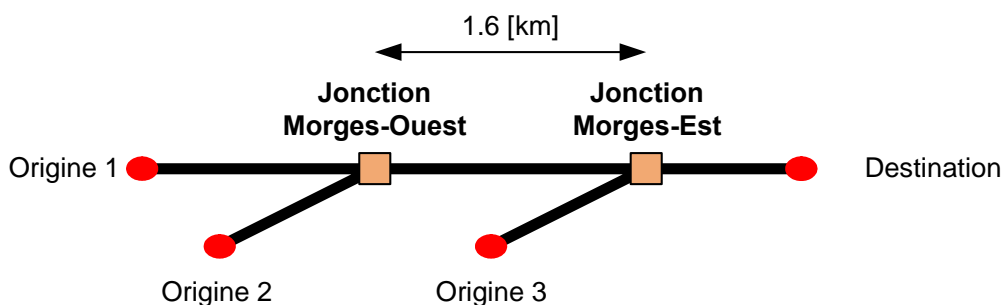


Figure 8 : Schématisation du réseau pris en compte dans l'étude de cas

Ce réseau offre l'avantage d'avoir fait l'objet d'une étude par microsimulation préalable à l'aide du logiciel AIMSUN [37]. Un travail de calibrage a donc déjà été réalisé. Des observations visuelles ont permis de contrôler le réalisme du comportement des véhicules simulés et d'amener les corrections nécessaires, notamment une augmentation du niveau d'agressivité des véhicules qui entrent sur l'autoroute. Une comparaison entre les valeurs de débits et vitesses mesurés sur le terrain en certains points du réseau (au niveau de la jonction Morges-Est) au moyen de caméras de mesures et les valeurs obtenues par la microsimulation en ces mêmes endroits, ont permis de vérifier les conditions d'écoulement du trafic. Finalement, l'examen du ratio entre le débit de véhicules enregistré sur la voie de gauche et celui de la voie de droite au niveau de l'entrée du trafic secondaire sur l'autoroute a permis de vérifier le comportement des usagers à l'approche de celle-ci. Ainsi, on admet que le travail d'analyse des résultats de la microsimulation peut se focaliser directement à l'indicateur d'insécurité, sans se soucier des étapes préalables et fastidieuses de calibration du trafic.

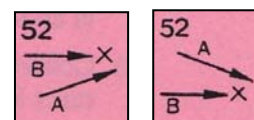
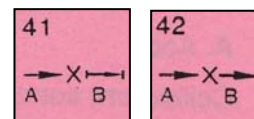
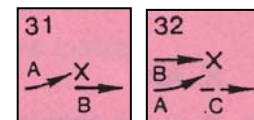
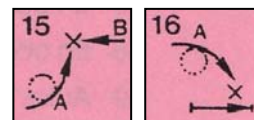
Ainsi, pour la microsimulation effectuée à l'aide du logiciel Aimsun NG, les données de trafic prises en compte dans cette étude sont semblables à celles considérées dans [37]. Basée sur une campagne de mesures effectuée le mardi 2 novembre 1999, de 7h00 à 8h00, la matrice Origine-Destination considère deux types de véhicules (véhicules légers et poids lourds). Elle est décomposée en périodes de 5 minutes. La répartition temporelle de l'entrée des véhicules à l'intérieur de la période se fait de manière aléatoire, selon une loi de répartition statistique de Poisson.

4.1 DONNÉES DE BASE POUR LA VALIDATION DE L'INDICATEUR

La validation du paramètre d'insécurité se fait en comparant les densités d'insécurité obtenues par la microsimulation avec les statistiques d'accidents relevés sur l'autoroute Genève – Lausanne, plus précisément les accidents en file. A noter qu'une totale correspondance n'est pas attendue, ne serait-ce qu'en raison de la non exhaustivité des données d'accidents qui proviennent de constats de police et qui négligent par conséquent tous les incidents réglés à l'amiable. Il s'agit ici de s'assurer d'une certaine concordance entre les relevés d'accidents en file et les valeurs de UD.

Parmi les fiches statistiques récoltées, ne sont donc retenues que celles correspondant aux catégories entrant dans le champ d'application du paramètre de densité d'insécurité, à savoir (selon les codes de l'Office Fédéral de la Statistique) :

- accident par dérapage ou perte de maîtrise : collision avec un véhicule en marche après dérapage (Code B.15) / collision avec un véhicule arrêté ou immobilisé après dérapage (Code B.16)
- accident lors de dépassement : collision avec le véhicule à dépasser lors du déplacement à gauche (Code D.31) / collision lors du déplacement à gauche avec un autre véhicule en train de dépasser (Code D.32) / autre cas lors de dépassement (Code D.39)
- accident par tamponnement : collision avec un véhicule immobile (Code E.41) / collision avec un véhicule se déplaçant (Code E.42) / autre cas de tamponnement (Code E.49)
- accident lors d'un contournement ou d'un changement de voie : collision lors de changement de voie ou après changement de voie (Code F.52) / autre cas lors du contournement ou changement de voie (Code F.59)



Remarque : cette restriction aux seuls accidents par l'arrière peut paraître trop limitative, néanmoins elle est indispensable puisque le paramètre d'insécurité ne renseigne que sur les accidents survenant entre deux véhicules se suivant. De plus, en observant les statistiques d'accidents des années 2001, 2002 et 2003, on relève près de 285 accidents sur la portion du réseau étudié (entre les kilomètres km 50.00 à km 65.00), dont plus de 60% sont des accidents en file, selon la définition donnée ci-dessus.

4.1.1 Zone d'étude

L'observation de la répartition géographique des accidents en file sur la chaussée Sud de l'autoroute Genève – Lausanne permet de préciser la zone d'étude. Si l'on considère les statistiques de l'année 2001 sur ce tronçon, on remarque en effet une densité d'accidents en file beaucoup plus marquée entre les kilomètres km 57.00 et km 64.00 ([Figure 9](#)).

Au vu du nombre plus élevé d'accidents en file présents entre les kilomètres km 57.00 et km 64.00, il semble donc opportun de se focaliser sur cette portion d'autoroute pour une étude de sécurité par le nouvel indicateur de sécurité.

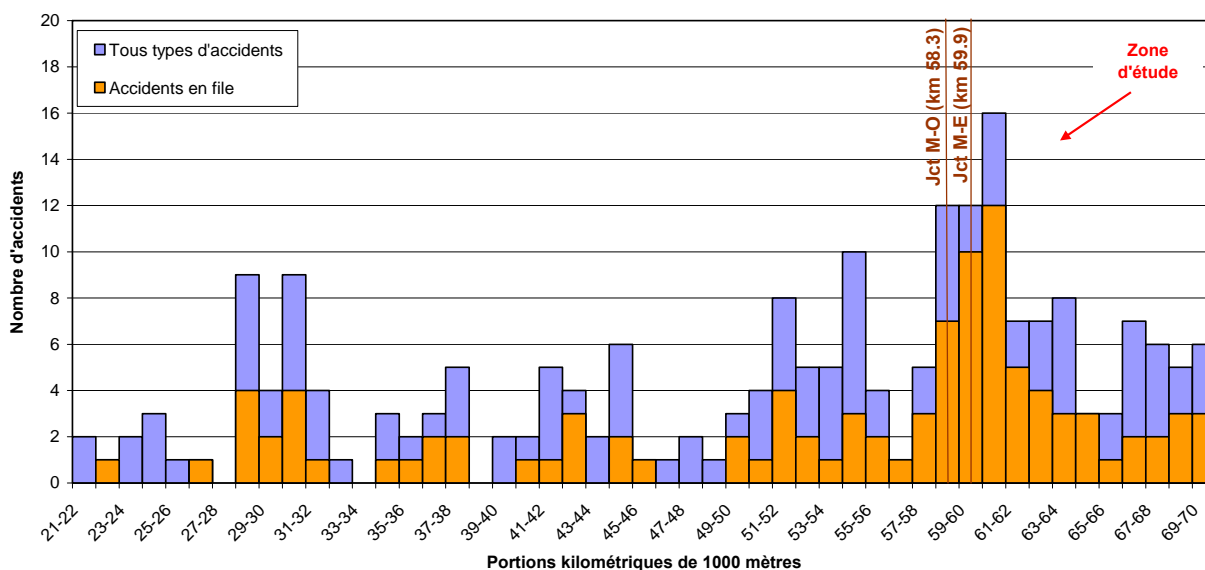


Figure 9 : Répartition kilométrique des accidents en file (année 2001) sur la chaussée Sud de l'autoroute Genève - Lausanne pour définir la zone d'étude

4.1.2 Référence temporelle des statistiques d'accidents

La matrice Origine-Destination considérée dans la microsimulation provient d'une étude de trafic de novembre 1999. Les statistiques d'accidents à considérer devraient donc provenir d'une référence temporelle similaire, soit les relevés d'accidents en file de 1999. Cependant, et devant le côté aléatoire de l'occurrence et de la localisation précise des accidents, il semble opportun de travailler sur un échantillonnage plus important, ce d'autant plus que l'indicateur d'insécurité est un paramètre qui renseigne sur l'insécurité routière de manière qualitative. Les statistiques d'accidents sont intéressantes, non pas pour le nombre exact d'accidents, mais plutôt pour la proportion d'accidents sur telle ou telle portion du réseau, d'où l'intérêt de considérer plusieurs années de données statistiques.

Idéalement, les données de base servant à la validation devraient être les fiches statistiques d'accidents en file de l'année 1999 à nos jours. Or, certaines de ces données ne sont pas disponibles. Ainsi, et partant de l'hypothèse que l'augmentation et la modification de la structure du trafic sur le tronçon autoroutier étudié ne sont pas suffisamment marquées pour influencer de manière significative la distribution géographique des accidents, il est supposé acceptable de considérer la somme des statistiques d'accidents en file des années 2001, 2002 et 2003 comme paramètre de comparaison permettant une validation du nouvel indicateur de sécurité.

Les données de trafic utilisées dans la simulation représentent l'heure de pointe du matin. Ainsi, pour être cohérent, il s'agirait de ne considérer que les accidents en file survenus durant cette période. Le problème serait alors qu'un tel tri des quittances statistiques par tranche horaire impliquerait un échantillonnage très faible, voire trop faible pour avoir une représentativité suffisante de la localisation des accidents. En effet, si l'on observe la distribution des accidents aux heures de pointe du matin (HPM entre 7h00 et 8h00) et du soir (HPS entre 17h00 et 18h00), on se rend rapidement compte du faible échantillonnage de données disponibles, même en considérant les statistiques d'accidents durant trois années consécutives (Figure 10).

Ainsi, pour des portions kilométriques de 500 mètres, le nombre d'accidents en file recensés varie de 0 à 3 pour l'heure de pointe du matin et de 0 à 4 pour l'heure de pointe du soir. En considérant une période de pointe plus étendue (de 6h00 à 9h00 pour le matin et de 16h00 à 19h00 pour le soir), on obtient un échantillonnage un peu plus important, quoique toujours relativement limité (Figure 10).

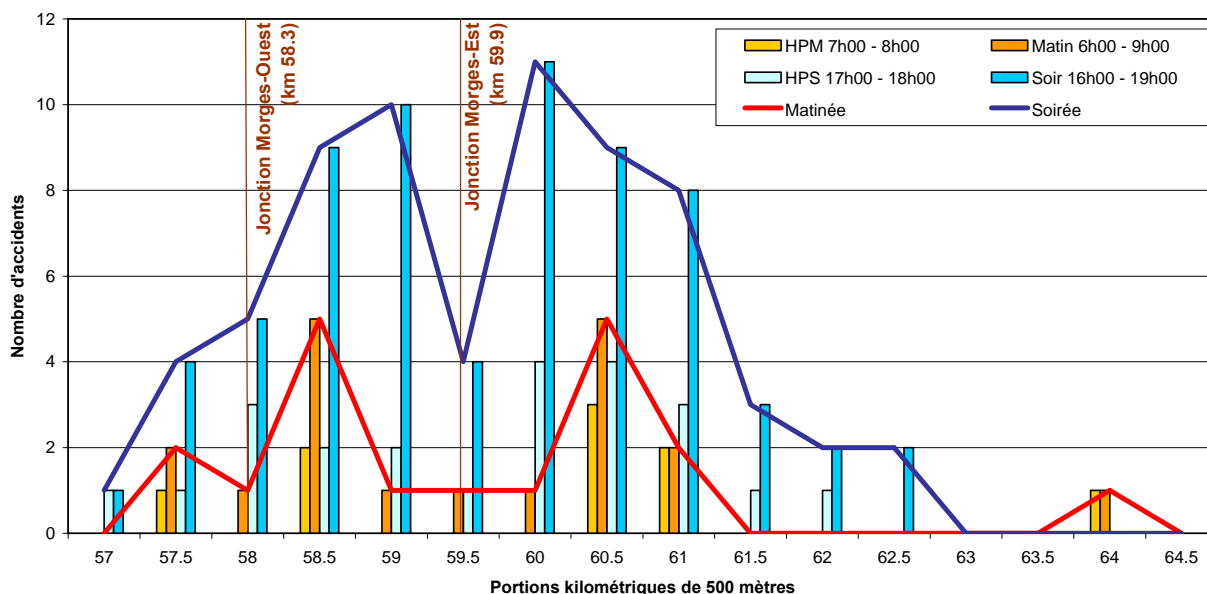


Figure 10 : Distribution temporelle des accidents en file (somme des années 2001, 2002 et 2003) par portion kilométrique de 500 mètres.

Même en augmentant la dimension des portions kilométriques considérées, le nombre d'accidents en file recensés en matinée et en soirée reste relativement faible, avec un maximum de 6 et respectivement 20 accidents en file recensés en trois ans (Figure 11).

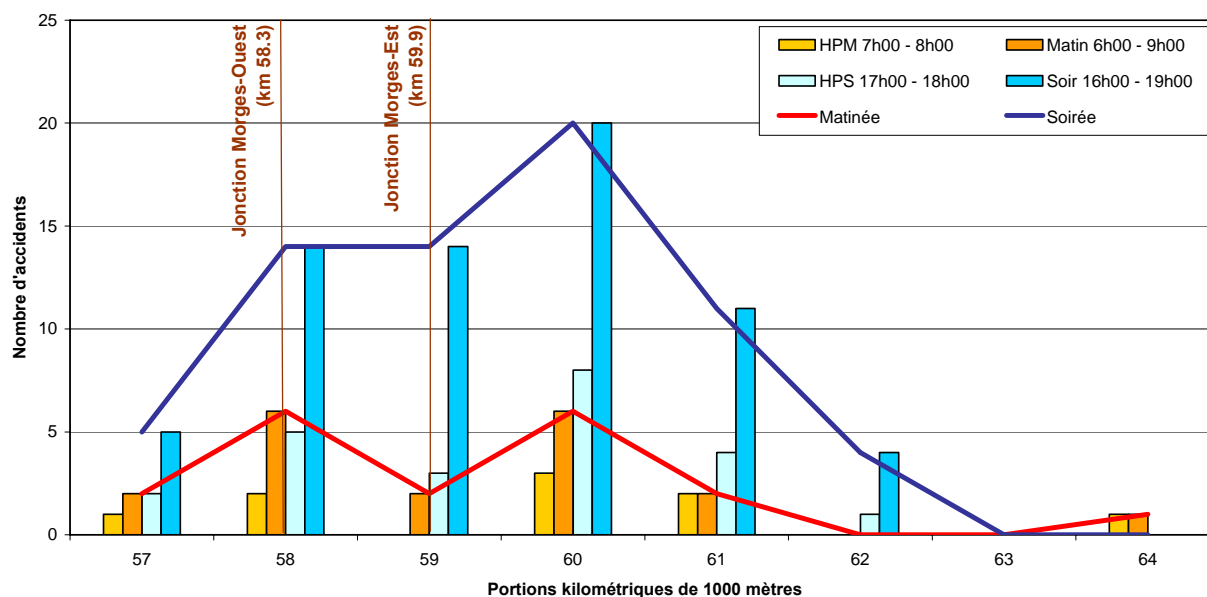


Figure 11 : Distribution temporelle des accidents en file (somme des années 2001, 2002 et 2003) par portions kilométriques de 1000 mètres

Pour palier à cet inconvénient, il est décidé de considérer les statistiques d'accidents durant toute la journée. On obtient ainsi un nombre d'accidents par portions kilométriques qui soit significatif de la localisation des collisions en file (Figure 12).

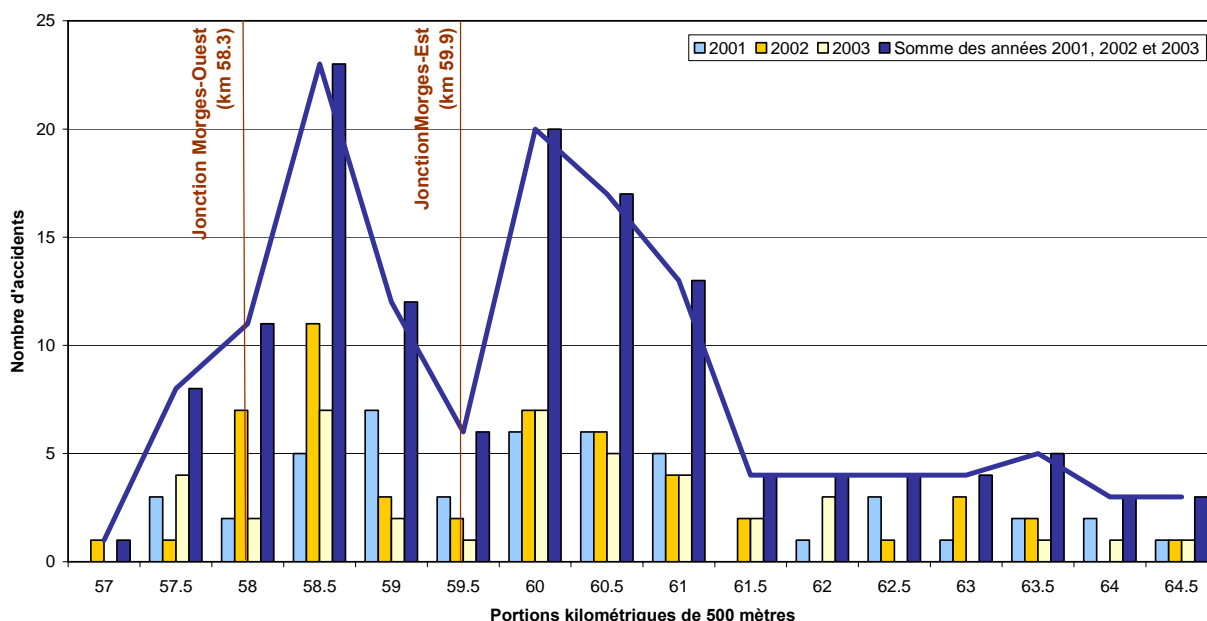


Figure 12 : Distribution des accidents en file (somme des années 2001, 2002 et 2003) par portion kilométrique de 500 mètres

Cette agrégation des statistiques d'accidents est considérée comme acceptable étant donné que les courbes de distribution des vitesses moyennes du matin et du soir sont assez semblables et que la structure du trafic présente une relativement bonne symétrie entre le matin et le soir (malgré un pic du matin d'une un peu plus courte durée que celle du soir), comme le démontre le relevé ci-dessous :

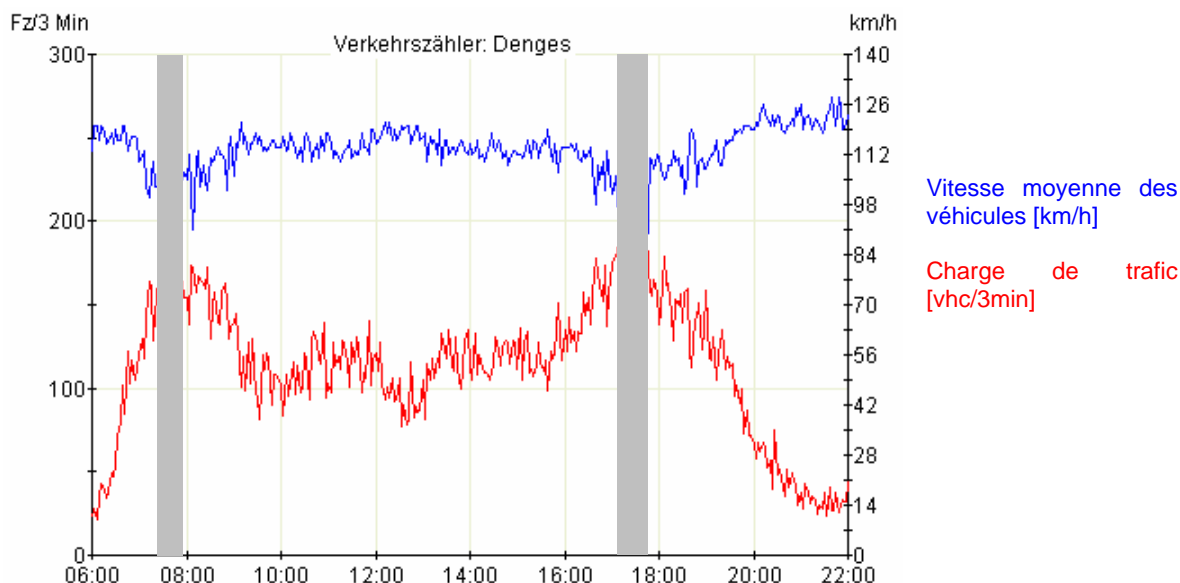


Figure 13 : Relevé des conditions de trafic sur l'autoroute Genève - Lausanne, le mardi 15 octobre 2002 (compteur de Denges, direction Lausanne) [Source : <http://verkehr.cnlab.ch/verkehr1/>]

Dans la présente étude, la donnée de base considérée pour la validation de la densité d'insécurité est donc la somme des accidents en file recensés durant toute la journée sur une durée de trois ans (2001, 2002 et 2003).

5 LA DENSITÉ D'INSÉCURITÉ

Avant d'aller plus en avant dans l'analyse approfondie de la validité de la densité d'insécurité, il est nécessaire de bien comprendre son fonctionnement pour ensuite s'assurer qu'il représente bien la dangerosité des sections de route face aux collisions en file.

5.1 ETUDE PARAMÉTRIQUE

Il a été fait précédemment (cf. Chapitre 3.2) l'hypothèse que la densité d'insécurité fait intervenir trois paramètres distincts et est représentée par la formule $UD = R_d^\alpha \cdot \Delta S^\beta \cdot S^\gamma$.

Une première série de simulations, variant les valeurs des coefficients α , β et γ , est donc réalisée dans le but d'étudier le comportement individuel de chacun de ces paramètres. Pour ce faire, un temps de réaction du véhicule suiveur correspondant au temps de réaction standard en Suisse, soit 2 secondes, est considéré.

En première analyse, 15 répliques sont effectuées. Ce nombre, correspondant à une valeur souvent usitée dans les études préliminaires menées par le Laboratoire des voies de circulation, semble en effet pouvoir fournir des résultats suffisamment représentatifs.

5.1.1 Variation du paramètre R_d

Le paramètre R_d représente le quotient entre la décélération réelle du véhicule de tête et la décélération théorique maximale du véhicule suiveur. Sa valeur devrait donc, selon toute vraisemblance, être nulle (ou tout au moins petite) au début de la simulation, lorsqu'il y a encore peu de trafic sur le réseau. Sa valeur devrait ensuite croître avec l'augmentation du nombre de véhicules et la création d'une congestion due notamment aux entrées sur l'autoroute. Si tel est le cas, on peut conclure que la notion d'hypothétique accident utilisée dans le nouvel indicateur de sécurité est applicable et compatible avec le niveau de représentation du comportement des usagers au travers de l'outil Aimsun NG.

Les résultats obtenus après 15 microsimulations montrent une évolution du paramètre R_d dans le temps et dans l'espace conforme aux attentes. Une analyse du kilomètre km 59.00 (Annexe 2) indique, par exemple, qu'avant la section 21 (km 59.27 – km 59.36), le paramètre R_d reste quasi nul et ce tout au long de l'heure de simulation. Puis, plus on s'approche de la jonction Morges-Est, plus la valeur de R_d augmente au cours du temps.

L'évolution de R_d dépend donc bien des conditions de trafic présentes sur le réseau. La distribution géographique de la moyenne des valeurs de R_d obtenues pour chaque période d'agrégation fournit donc une indication de la probabilité d'une hypothétique collision durant l'heure de pointe. Ainsi, d'après les résultats obtenus en considérant un découpage du réseau par kilomètre (Figure 14), la plus grande probabilité d'une hypothétique collision durant l'heure de pointe se situe entre le km 59.00 et le km 60.00.

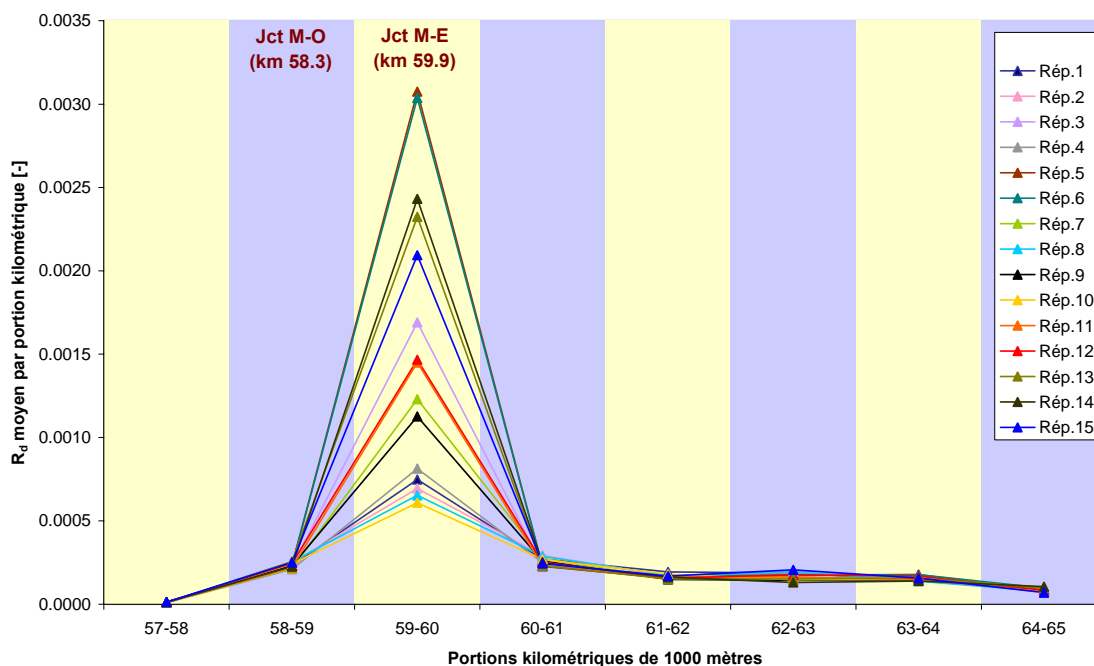


Figure 14 : Paramètre R_d moyen : indicateur de la probabilité d'une hypothétique collision

5.1.2 Variation des paramètres ΔS et S

De la même manière que pour le paramètre R_d , la moyenne des valeurs ΔS et S obtenues par période d'agrégation indique, par portion kilométrique, la différence de vitesse entre 2 véhicules, respectivement la vitesse du véhicule suiveur, lors d'une hypothétique collision survenant à l'heure de pointe du matin. (Figure 15 et Figure 16).

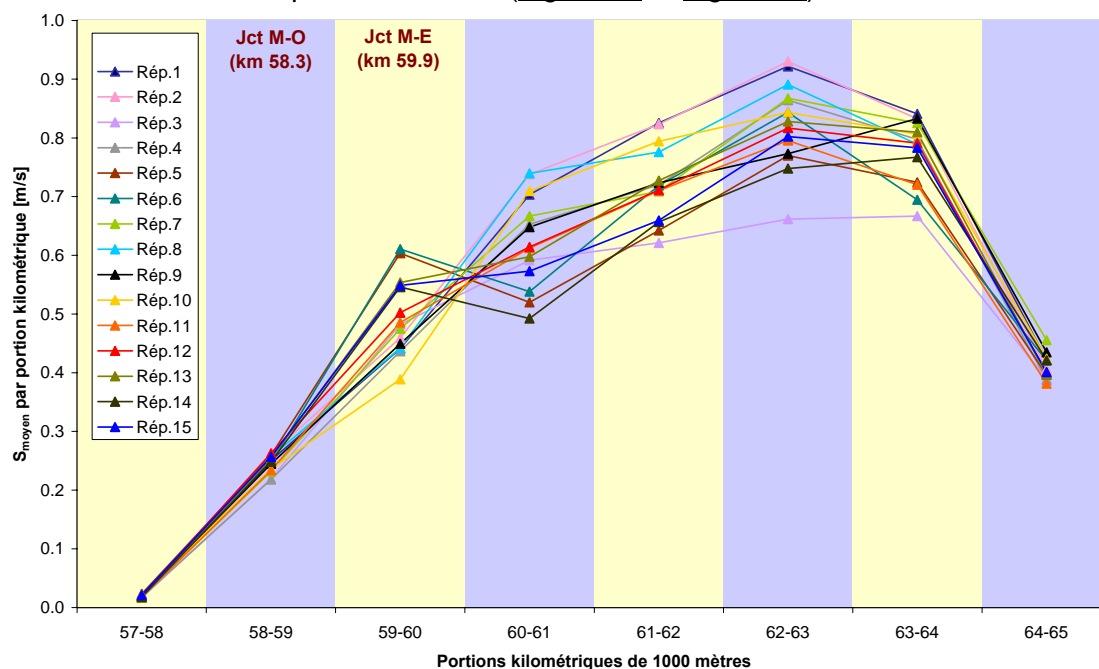


Figure 15 : Evolution du paramètre S_{moyen}

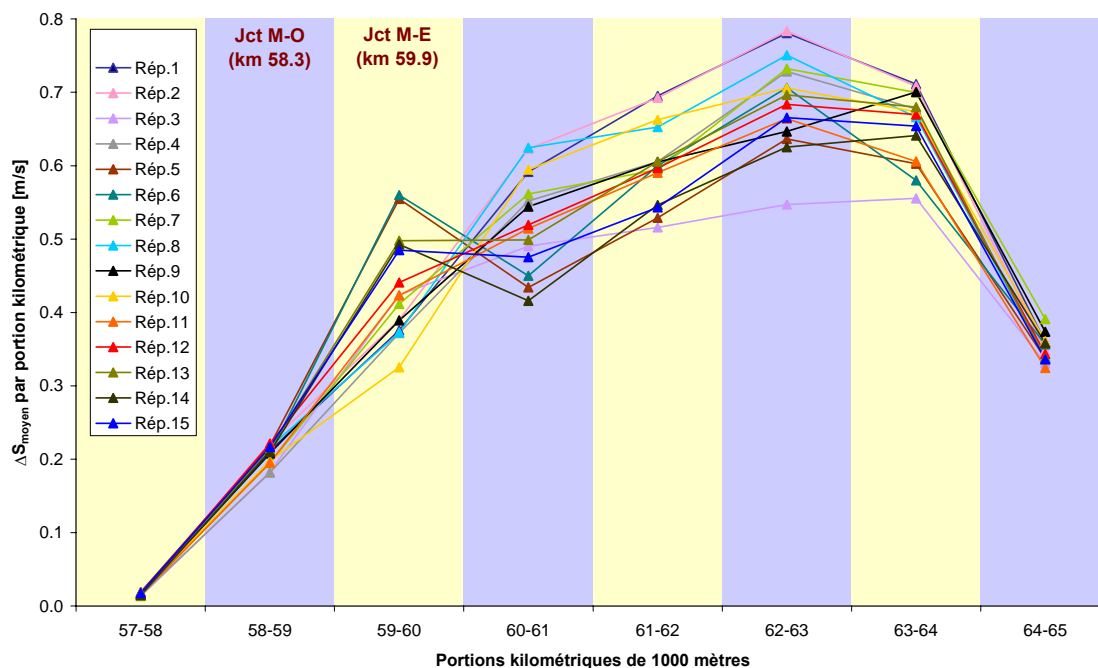


Figure 16 : Evolution du paramètre ΔS_{moyen}

La distribution géographique des paramètres ΔS_{moyen} et S_{moyen} renseigne ainsi sur la gravité potentielle d'une hypothétique collision sur le réseau, montrant une gravité maximale atteinte sur la portion kilométrique km 62.00 – km 63.00 ([Figure 15](#) et [Figure 16](#)).

Remarque : lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement des usagers au travers de paramètres déterminés par la microsimulation tels que la vitesse de circulation, l'effet des bords du réseau modélisé peut ne pas être négligeable. Dans la présente étude, les résultats obtenus sur les sections aux extrémités sont considérés avec un œil critique, voire ignorés. L'influence des bords n'est cependant pas jugée suffisante pour influencer la totalité des résultats, le réseau modélisé étant d'une dimension relativement importante (8 kilomètres).

5.1.3 Variation de la densité d'insécurité UD

L'étude de la variation du quotient R_d a permis de vérifier la cohérence et la validité de la notion d'une hypothétique collision. Il est ainsi possible de disposer d'une indication sur la potentialité d'accidents sur un réseau à partir d'une microsimulation, qui rappelons-le, contrôle le comportement des usagers par un modèle de poursuite qui interdit toute collision. La prise en compte simultanée de ce quotient R_d et des paramètres ΔS et S devrait donc permettre d'obtenir une indication sur la dangerosité du réseau étudié.

Une série de 15 répliques est réalisée en considérant une équation de la densité d'insécurité UD avec les coefficients suivants : $\alpha = 1$, $\beta = 1$ et $\gamma = 1$, toujours avec un temps de réaction du véhicule suiveur équivalent au temps de réaction standard suisse, soit 2 [s].

L'observation de l'évolution temporelle du paramètre UD aux diverses sections du réseau étudié, notamment celles du km 59.00 (Annexe 3), démontre la variation de la valeur de la densité d'insécurité au cours de la période de simulation et en fonction de la localisation. Le paramètre UD dépend donc bien des conditions de trafic présentes sur le réseau étudié. Par conséquent, la distribution géographique de la moyenne des valeurs UD obtenues par période d'agrégation donne une information sur la dangerosité des sections.

Ainsi, les résultats obtenus après une première série de 15 simulations indiquent, pour l'heure de pointe du matin, une dangerosité fortement plus marquée sur la portion kilométrique km 59.00 – km 60.00 que sur le reste du réseau étudié ([Figure 17](#)).

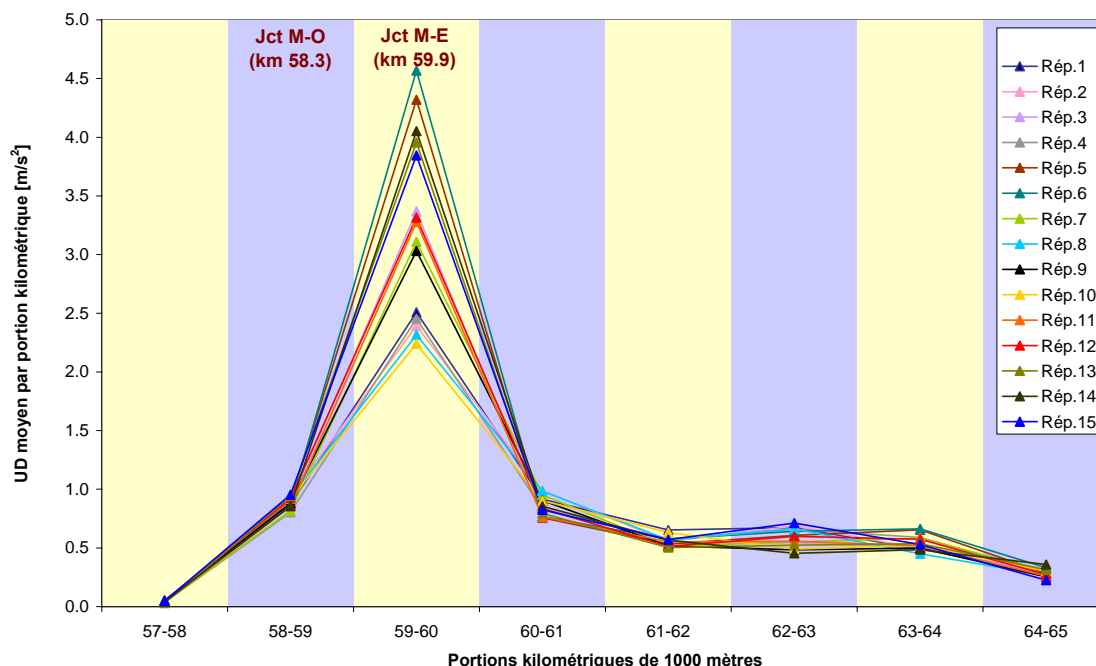


Figure 17 : Evolution du paramètre UD moyen

5.2 VARIABILITÉ DE LA DENSITÉ D'INSÉCURITÉ

La microsimulation ne fournit pas une solution unique à un problème, mais reproduit un des comportements possibles du système modélisé. Effectuée plusieurs fois dans des conditions similaires, elle peut fournir des résultats différents. Si l'on veut prétendre à une bonne représentativité des résultats, il est par conséquent primordial de considérer une analyse statistique des outputs et donc de recourir à plusieurs réplifications.

Dans le cas présent, en observant les outputs obtenus après une simulation faisant intervenir 15 réplifications, on se rend rapidement compte de la variation des résultats, que ce soit au niveau des paramètres R_d , ΔS ou S , ou directement au niveau de la densité d'insécurité (Annexe 4). Pour un découpage du réseau en portions de 1000 mètres, on observe ainsi des écarts-types pouvant aller jusqu'à 24 [%] de la valeur moyenne de la densité d'insécurité (Tableau 1).

Portion kilométrique	Densité d'insécurité [m/s²]		
	Moyenne	Ecart-type	
	μ	σ	%
km 57.00 – km 58.00	0.04	0.01	15%
km 58.00 – km 59.00	0.89	0.05	5%
km 59.00 – km 60.00	3.25	0.77	24%
km 60.00 – km 61.00	0.86	0.08	10%
km 61.00 – km 62.00	0.56	0.04	8%
km 62.00 – km 63.00	0.59	0.08	14%
km 63.00 – km 64.00	0.54	0.06	11%
km 64.00 – km 65.00	0.29	0.03	11%

Tableau 1 : Variabilité des valeurs de la densité d'insécurité sur 15 réplifications, par portion kilométrique de 1000 mètres

Devant l'importance de ces écart-types, il semble impératif de déterminer quel échantillonnage est suffisamment important pour que les densités d'insécurité obtenues soient représentatives. Il s'agit donc de déterminer le nombre de réplifications nécessaires à une bonne représentativité des valeurs du paramètre d'insécurité obtenues par simulation.

Cette détermination se fait ici grâce à la méthode Averill & Kelton [4]. Celle-ci fournit le nombre de réplifications nécessaires pour que la variable observée ait une valeur à plus ou moins K [%] de la moyenne avec un intervalle de confiance de α [%], à partir des équations suivantes :

$$n^* = n \cdot \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad [-] \quad (\text{Équation 7})$$

Avec

n^* : nombre de réplifications nécessaires
 n : nombre de réplifications de l'expérience pilote
 $h = t_{n-1; 1-\alpha/2} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$: intervalle de confiance de l'expérience pilote
 h^* : intervalle de confiance

Dans le cas présent, la variable analysée est le paramètre d'insécurité kilométrique ². Les résultats obtenus après une expérience pilote de $n = 50$ réplifications considérant un intervalle de confiance de $\alpha = 5$ [%] sont les suivants :

Portion kilométrique	Densité d'insécurité [m/s ²]			Nbre d'expériences nécessaires	
	μ	σ	h	n^* ($K = \pm 5\%$)	n^* ($K = \pm 10\%$)
km 57.00 – km 58.00	0.04	0.01	0.00	29	7
km 58.00 – km 59.00	0.90	0.08	0.02	11	3
km 59.00 – km 60.00	3.18	0.99	0.28	156	39
km 60.00 – km 61.00	0.87	0.08	0.02	14	3
km 61.00 – km 62.00	0.60	0.06	0.02	16	4
km 62.00 – km 63.00	0.57	0.09	0.03	41	10
km 63.00 – km 64.00	0.53	0.08	0.02	37	9
km 64.00 – km 65.00	0.27	0.04	0.01	45	11
				Moyenne = 44	Moyenne = 11

Tableau 2 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue après 50 réplifications pour des tronçons d'analyse de 1000 mètres

Ainsi, avec un découpage par portion de 1000 mètres, la prise en compte des résultats de 50 réplifications semble suffisante pour obtenir une valeur représentative de la densité d'insécurité avec un intervalle de confiance de ± 5 [%], tout au moins si l'on considère une moyenne sur l'ensemble du réseau étudié. Si l'on s'attarde sur le nombre de réplifications nécessaires à assurer une bonne représentativité des résultats par portion kilométrique, il en est tout autrement. Une forte variation du nombre d'expériences nécessaires est en effet présente, avec des extrêmes situés sur deux portions adjacentes (11 réplifications nécessaires à la portion kilométrique km 58.00 – km 59.00 et 156 à la portion km 59.00 – km 60.00, ceci en admettant acceptables des résultats à ± 5 [%] de la moyenne) (**Tableau 2**).

La question se pose alors de savoir si cette grande différence dans la variabilité des résultats provient directement de la microsimulation et de la notion de densité d'insécurité ou si cela est imputable à un découpage du réseau trop arbitraire. Des analyses par portion de 500 mètres puis par portion de 100 mètres ³ sont donc réalisées, toujours en considérant 50 réplifications.

² On entend ici par paramètre d'insécurité kilométrique, la valeur de la densité d'insécurité par portion de route analysée, section pouvant être de 1000 mètres mais aussi de plus faible étendue.

³ L'analyse par portion de 100 mètres fait intervenir quelques portions de plus grande dimension (sections pointillées sur les figures), la modélisation n'étant pas suffisamment détaillée pour permettre le calcul de la densité d'insécurité par portion de 100 mètres sur la totalité du réseau.

Les résultats obtenus avec différents découpages du réseau permettent tout d'abord de montrer l'influence que peut avoir la taille des portions kilométriques sur les valeurs de la densité d'insécurité le long du réseau étudié.

Ainsi, alors qu'une analyse par tronçons de 1000 mètres indique une densité d'insécurité maximale de 3.2 [m/s²] à la portion kilométrique km 59.00 – km 60.00 (Figure 18), cette valeur maximale se monte à 5.7 [m/s²] à la portion kilométrique km 59.50 – km 60.00 si l'on considère des tronçons de 500 mètres (Figure 19). Cette valeur maximale s'élève même à 7.0 [m/s²] si l'on considère des sections de 100 mètres (Figure 20).

L'analyse de la dangerosité du réseau peut alors se faire de manière plus ou moins détaillée selon les portions kilométriques choisies. Dans le cas présent, on peut notamment, grâce à un découpage par section de 100 ou 500 mètres, mettre en évidence un deuxième « pic de dangerosité » (portion kilométrique km 58.20 – km 58.60) qui n'est pas relevé par l'analyse par portions de 1000 mètres.

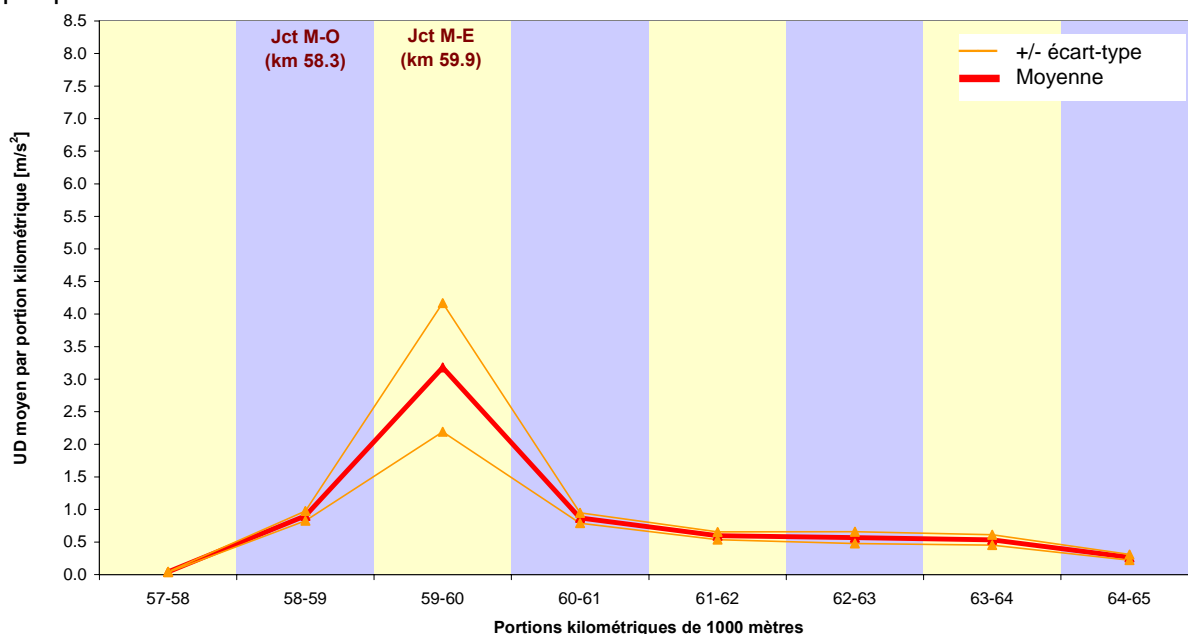


Figure 18 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 1000 mètres : moyenne \pm écart-type sur 50 répliques

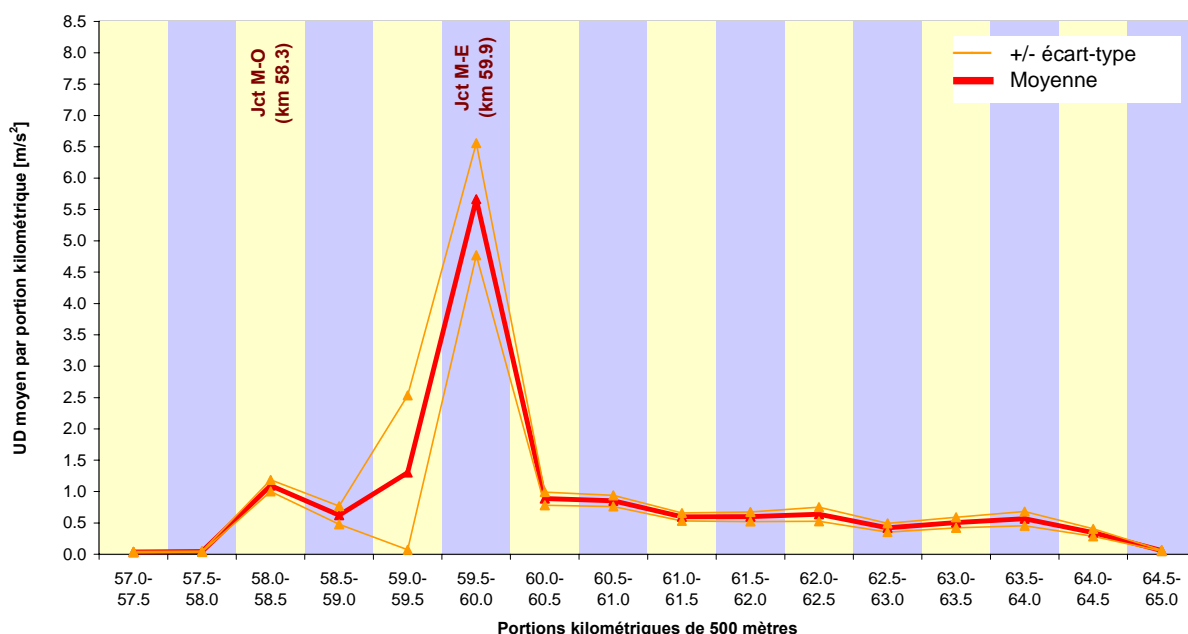


Figure 19 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 500 mètres : moyenne et écart-type sur 50 répliques

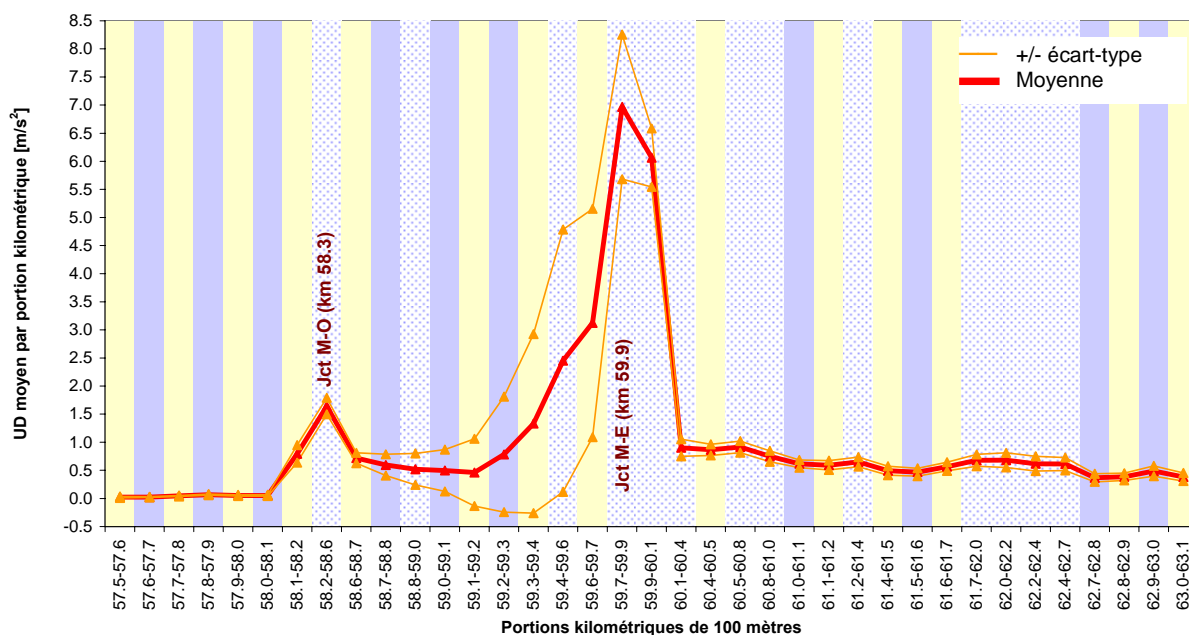


Figure 20 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 100 mètres : moyenne et écart-type sur 50 réplifications

Grâce à une analyse statistique des résultats, on s'aperçoit également de l'influence du découpage des portions kilométriques sur la variabilité de la densité d'insécurité et sur le nombre de réplifications nécessaires à une validité statistiques des résultats.

Avec des portions kilométriques de 500 mètres, 130 réplifications sont nécessaires en moyenne, et plus de 1440 si l'on se focalise sur la portion kilométrique km 59.00 – km 59.50 (Tableau 3), alors que le nombre moyen de réplifications nécessaires s'élève à 44 dans le cas de portions kilométriques de 1000 mètres (Tableau 2), toujours en admettant un intervalle de confiance de ± 5 [%].

Portion kilométrique	Densité d'insécurité [m/s²]			Nbre d'expériences nécessaires	
	μ	σ	h	n^* (K = $\pm 5\%$)	n^* (K = $\pm 10\%$)
km 57.00 – km 57.50	0.04	0.01	0.00	84	21
km 57.50 – km 58.00	0.04	0.01	0.00	37	9
km 58.00 – km 58.50	1.09	0.09	0.03	11	3
km 58.50 – km 59.00	0.62	0.15	0.04	89	22
km 59.00 – km 59.50	1.30	1.23	0.35	1442	361
km 59.50 – km 60.00	5.66	0.89	0.25	40	10
km 60.00 – km 60.50	0.89	0.10	0.03	23	6
km 60.50 – km 61.00	0.85	0.09	0.03	18	4
km 61.00 – km 61.50	0.59	0.06	0.02	18	4
km 61.50 – km 62.00	0.60	0.08	0.02	27	7
km 62.00 – km 62.50	0.64	0.11	0.03	50	13
km 62.50 – km 63.00	0.42	0.07	0.02	43	11
km 63.00 – km 63.50	0.51	0.08	0.02	45	11
km 63.50 – km 64.00	0.57	0.11	0.03	65	16
km 64.00 – km 64.50	0.34	0.06	0.02	48	12
km 64.50 – km 65.00	0.06	0.01	0.00	42	11
Moyenne = 130				Moyenne = 33	

Tableau 3 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue après 50 réplifications pour des tronçons d'analyse de 500 mètres

La taille des tronçons d'analyse semble donc avoir une importance non négligeable. En effet, plus la dimension des tronçons d'analyse est petite, plus la variabilité de la densité d'insécurité est grande et plus le nombre de répliques nécessaires à une validité statistique des accidents semble important. Or, si l'on revient à la définition de la densité d'insécurité, notion dont le premier paramètre d'activation est le freinage d'un véhicule de tête, on peut naturellement avancer que ce constat est cohérent et attendu. Il semble en effet peut probable, voire impossible, de définir un endroit précis où un véhicule entamera une manœuvre de freinage due aux conditions de trafic. A contrario, sa localisation à l'intérieur d'une certaine portion de route semble réalisable, ce d'autant plus que le tronçon est grand.

Pour avoir une certaine valeur statistique, la notion de densité d'insécurité devrait donc être appliquée à des tronçons d'analyse de dimension suffisante. Cependant, même avec des tronçons de dimension suffisante, les résultats obtenus présentent une variabilité importante. On se rend notamment compte que certaines répliques fournissent des résultats qui diffèrent de plus de trois écarts-type de la moyenne en certains endroits du réseau (résultats des répliques 23 et 40 à la portion kilométrique km 59.00 – km 60.00, Figure 21).

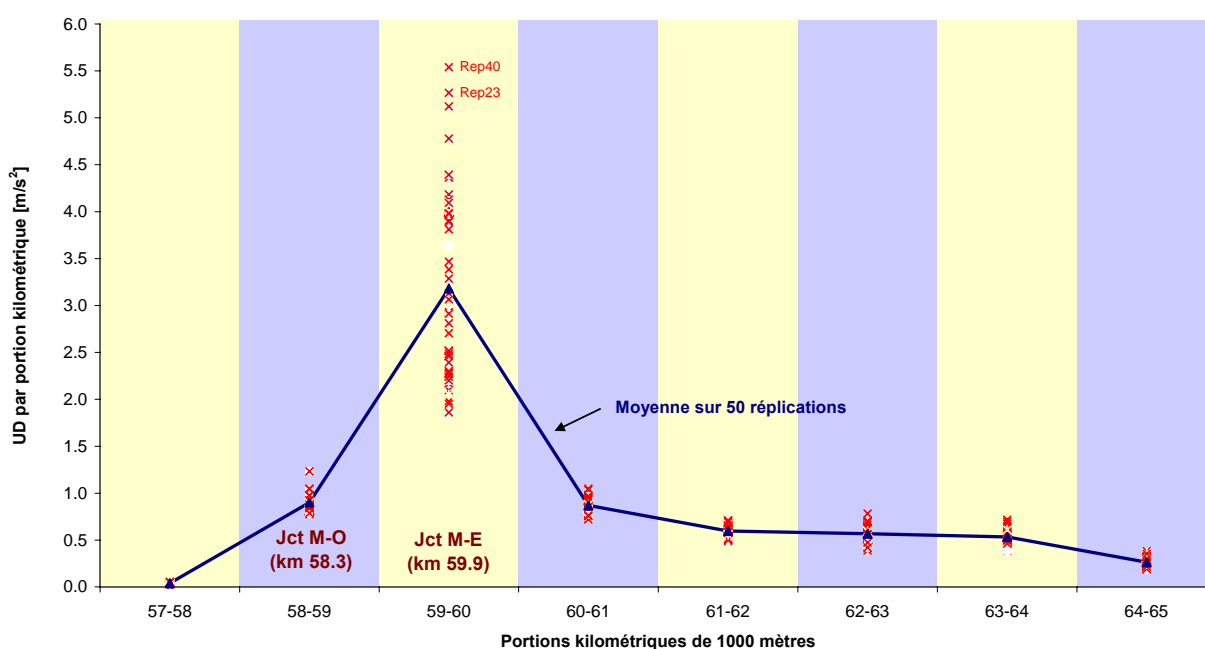


Figure 21 : Valeurs du paramètre d'insécurité obtenues par portion kilométrique de 1000 mètres sur un échantillonnage de 50 répliques

De telles différences entre les résultats des répliques résultent, soit de la variabilité propre à la notion de densité d'insécurité, soit d'un comportement non réaliste et non représentatif de la microsimulation, celle-ci reproduisant un jour particulier de l'année.

Afin d'obtenir un échantillonnage de qualité et suffisant pour assurer une validité statistique de la densité d'insécurité, les résultats obtenus après 50 répliques sont donc purgés. Ne sont ainsi retenues que les répliques dont les valeurs de densité kilométrique se situent dans un intervalle à moins de trois écarts-types de la moyenne.

Remarque : le critère de différence avec la moyenne inférieure à trois écarts-types découle d'une observation de la dispersion des résultats. Sur un échantillonnage de 50 répliques, 2 d'entre elles présentent des résultats s'écartant de la moyenne de plus de trois écarts-types et 16 d'entre elles de plus de deux écarts-types. Il semble donc opportun de considérer comme acceptable, du moins en première approche, l'ensemble des répliques de l'échantillonnage satisfaisant au critère d'écart à la moyenne de moins de trois écarts-types.

Les résultats des 50 réplifications sont donc analysés et purgés selon le critère préalablement défini. On obtient ainsi un échantillonnage de 46 réplifications présentant les résultats suivants :

Portion kilométrique	Densité d'insécurité [m/s ²]			Nbre d'expériences nécessaires	
	μ	σ	h	n* (K = $\pm 5\%$)	n* (K = $\pm 10\%$)
km 57.00 – km 58.00	0.04	0.01	0.00	30	8
km 58.00 – km 59.00	0.90	0.06	0.02	7	2
km 59.00 – km 60.00	3.01	0.82	0.24	121	30
km 60.00 – km 61.00	0.88	0.08	0.02	12	3
km 61.00 – km 62.00	0.60	0.06	0.02	15	4
km 62.00 – km 63.00	0.57	0.09	0.03	39	10
km 63.00 – km 64.00	0.53	0.08	0.02	39	10
km 64.00 – km 65.00	0.27	0.05	0.01	47	12
				Moyenne = 39	Moyenne = 10

Tableau 4 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue avec 46 réplifications (4 purgées sur 50 réalisées) pour des tronçons d'analyse de 1000 mètres

Les données retenues fournissent une variabilité plus faible que dans le cas de données non purgées. Le nombre de réplifications nécessaires à la bonne représentativité statistique de la densité d'insécurité s'abaisse à 39 pour 44 précédemment, pour des portions kilométriques de 1000 mètres et un intervalle de confiance de $\pm 5\%$ (Tableau 2 et Tableau 4). De la même manière, une analyse effectuée par portion de 500 mètres avec des données purgées (soit un échantillonnage de 46 réplifications retenues parmi les 50 réalisées) indique un abaissement de la variabilité des résultats (Tableau 3 et Tableau 5).

Portion kilométrique	Densité d'insécurité [m/s ²]			Nbre d'expériences nécessaires	
	μ	σ	h	n* (K = $\pm 5\%$)	n* (K = $\pm 10\%$)
km 57.00 - 57.50	0.04	0.01	0.00	85	21
km 57.50 - 58.00	0.04	0.01	0.00	38	9
km 58.00 - 58.50	1.10	0.09	0.03	11	3
km 58.50 - 59.00	0.60	0.06	0.02	14	3
km 59.00 - 59.50	1.07	0.96	0.29	1320	330
km 59.50 - 60.00	5.57	0.86	0.26	39	10
km 60.00 - 60.50	0.90	0.09	0.03	18	4
km 60.50 - 61.00	0.86	0.09	0.03	18	5
km 61.00 - 61.50	0.60	0.06	0.02	16	4
km 61.50 - 62.00	0.60	0.08	0.02	27	7
km 62.00 - 62.50	0.64	0.11	0.03	47	12
km 62.50 - 63.00	0.42	0.07	0.02	45	11
km 63.00 - 63.50	0.50	0.09	0.03	47	12
km 63.50 - 64.00	0.57	0.12	0.03	68	17
km 64.00 - 64.50	0.35	0.06	0.02	51	13
km 64.50 - 65.00	0.06	0.01	0.00	43	11
				Moyenne = 118	Moyenne = 29

Tableau 5 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue avec 46 réplifications (4 purgées sur 50 réalisées) pour des tronçons d'analyse de 500 mètres

Malgré ce tri, le critère d'Averill & Kelton n'est pas rigoureusement satisfait sur les différents tronçons d'analyse, mais l'est en moyenne sur l'ensemble du réseau étudié. La question est alors de savoir s'il faut-il en déduire que la notion de densité d'insécurité n'est pas pertinente et représentative de la dangerosité des sections du réseau.

Si l'on observe l'évolution par portion kilométrique de 1000 mètres de la moyenne de la densité d'insécurité le long du réseau ainsi que l'évolution des courbes à plus ou moins 2 écarts-types de la moyenne, on se rend compte que quelque soit la courbe considérée, on obtient toujours le même schéma en ce qui concerne la dangerosité du réseau (Figure 22).

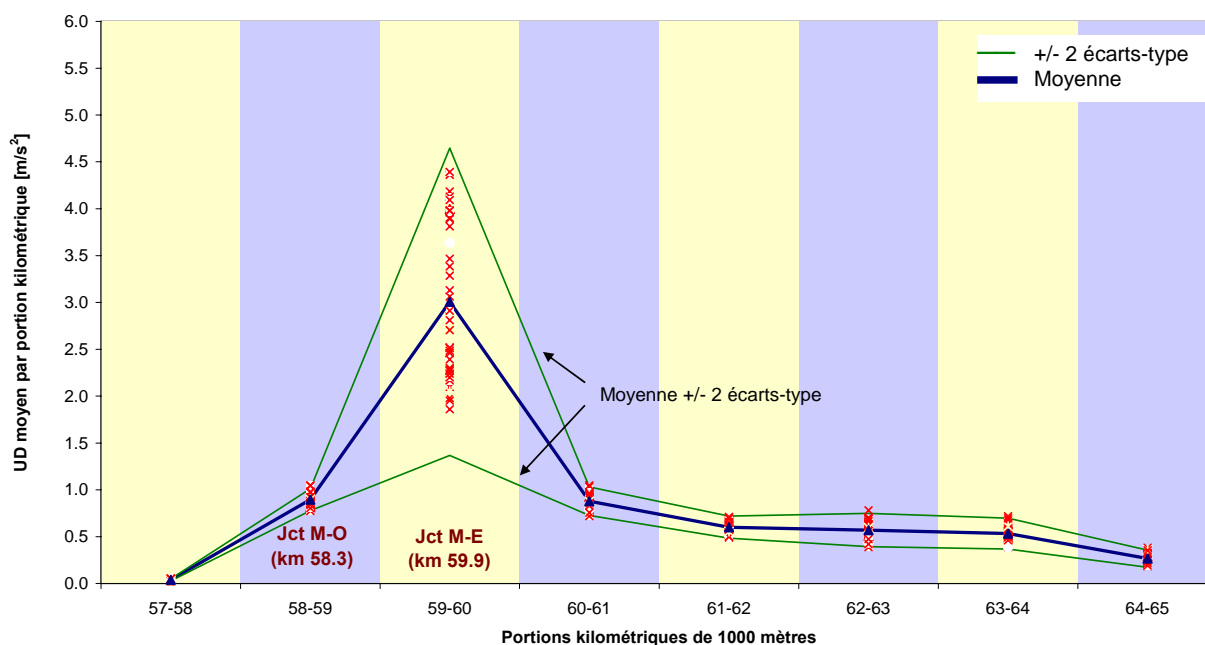


Figure 22 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 1000 mètres : moyenne \pm 2 écarts-type sur 46 réplifications (échantillonnage purgé de 50 réplifications)

La portion kilométrique km 59.00 – km 60.00 est toujours celle présentant la densité d'insécurité la plus élevée, alors que le reste du réseau est plus ou moins au même niveau de dangerosité. Cela est également le cas si l'on considère les courbes moyenne \pm un écart-type obtenues à partir des 50 réplifications non purgées (Figure 18). Pour des portions kilométriques de 1000 mètres, le fait de purger les réplifications selon leur écart à la moyenne ne modifie donc pas l'allure de la courbe de densité d'insécurité obtenue le long du réseau étudié. Les pics sont certes plus ou moins importants, mais la localisation des lieux les plus dangereux est identique.

La notion de densité d'insécurité n'est destinée qu'à fournir un élément chiffrable permettant de comparer des portions de route au niveau de leur dangerosité. L'important n'est alors pas la valeur absolue du paramètre UD sur une section d'analyse, mais sa valeur relative par rapport aux valeurs présentes sur l'ensemble des autres tronçons du réseau.

Ainsi, malgré une certaine dispersion statistique, la valeur moyenne de UD sur un échantillonnage de 50 réplifications peut être considérée comme représentative de la dangerosité des sections du réseau étudié ici, tout au moins pour des portions kilométriques de 1000 mètres.

Pour des sections de dimension plus restreintes, la variabilité des résultats est telle que son influence sur la valeur relative de UD n'est plus négligeable. On observe ainsi qu'avec des tronçons de 500 mètres et malgré des réplifications purgées selon le critère de résultats ayant un écart à la moyenne d'au plus deux écarts-types, les courbes d'évolution de la valeur de UD_{moyen} le long du réseau n'indiquent pas le même classement au niveau de la dangerosité des sections. Si l'on considère la courbe de la moyenne moins deux écarts-types, la portion kilométrique km 59.00 – km 59.50 présente une valeur UD nulle ⁴, soit la valeur la plus faible sur l'ensemble du réseau (Figure 23).

⁴ Cette valeur est en fait négative, valant -0.9 [m/s²] dans cette portion. Comme la définition de densité d'insécurité exclut toute valeur non positive, on définit cette valeur comme nulle.

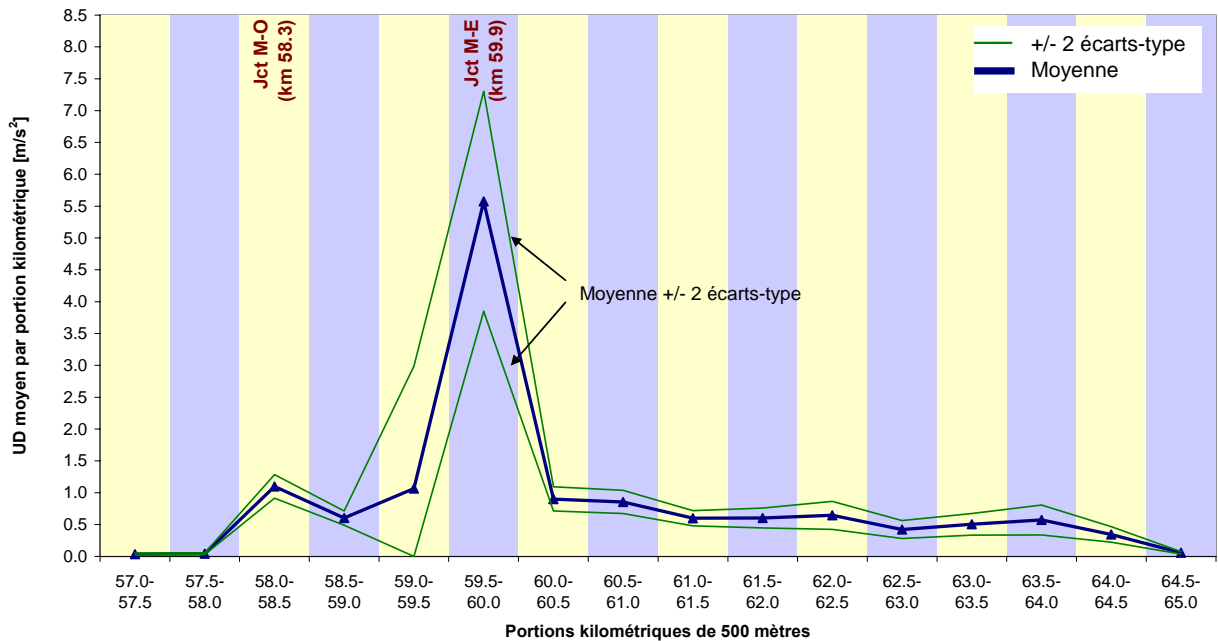


Figure 23 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 500 mètres : moyenne \pm 2 écarts-types sur 46 réplifications (échantillonnage purgé de 50 réplifications)

Si l'on considère la courbe de la moyenne plus deux écarts-types, la portion kilométrique km 59.00 – km 59.50 présente alors une dangerosité supérieure à une grande partie du reste du réseau. La variabilité des résultats peut donc influencer de manière significative la dangerosité relative déterminée pour des portions kilométriques de 500 mètres. Un constat similaire se retrouve par ailleurs avec des portions kilométriques de 100 mètres.

6 VALIDATION DE LA DENSITÉ D'INSÉCURITÉ

L'analyse des résultats fournis par microsimulation a permis de démontrer la valeur statistique de la notion de densité d'insécurité. La prochaine étape consiste à valider cette notion en s'assurant qu'elle exprime bien la « dangerosité » des sections du réseau. Cette validation se réalise en confrontant la distribution spatiale des relevés d'accidents en file avec celle de l'indicateur d'insécurité (Chapitre 4.1).

Les valeurs moyennes de UD obtenues après 50 simulations de l'heure de pointe du matin sont donc comparées avec les statistiques d'accidents en file relevés en 2001, 2002 et 2003, cela en considérant plusieurs découpage du réseau (Figure 24, Figure 25 et Figure 26).

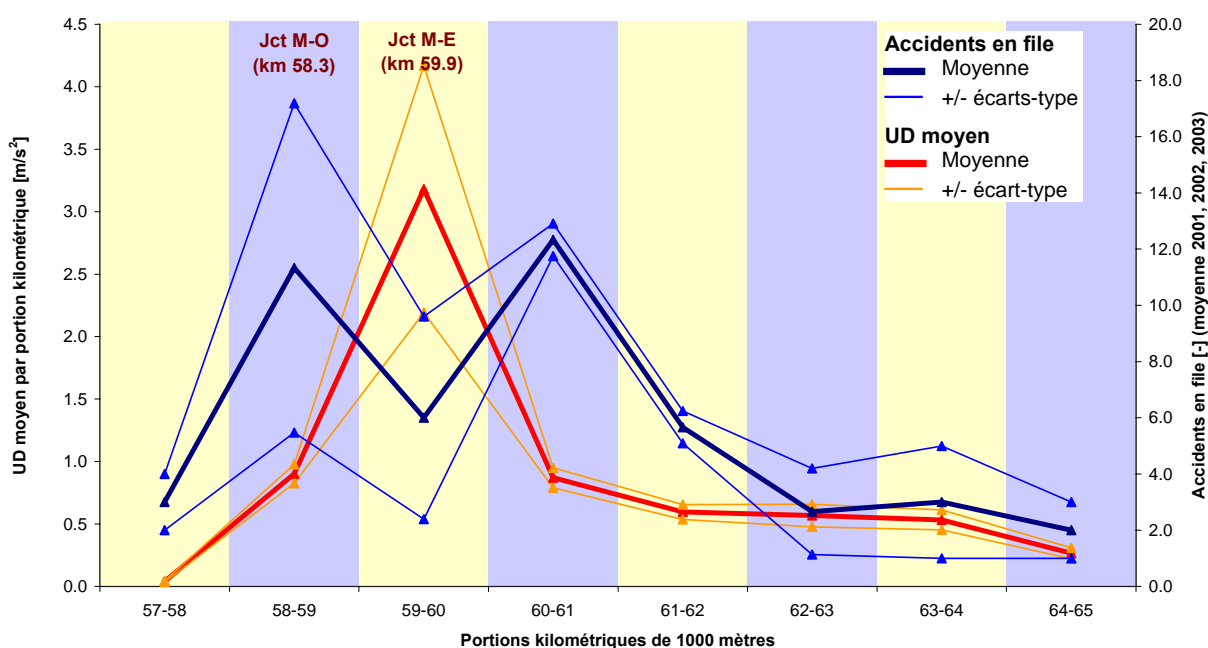


Figure 24 : Evolution de la densité d'insécurité et des statistiques d'accidents en file par portion kilométrique de 1000 mètres : moyenne \pm écart-type

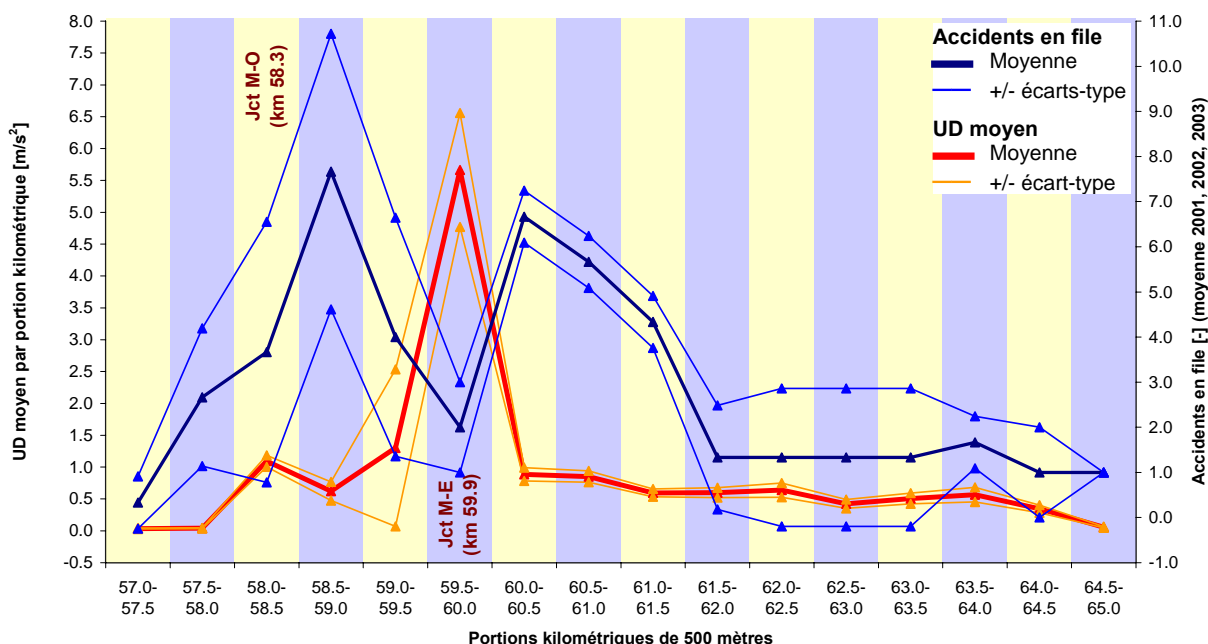


Figure 25 : Evolution de la densité d'insécurité et des statistiques d'accidents en file par portion kilométrique de 500 mètres : moyenne \pm écart-type

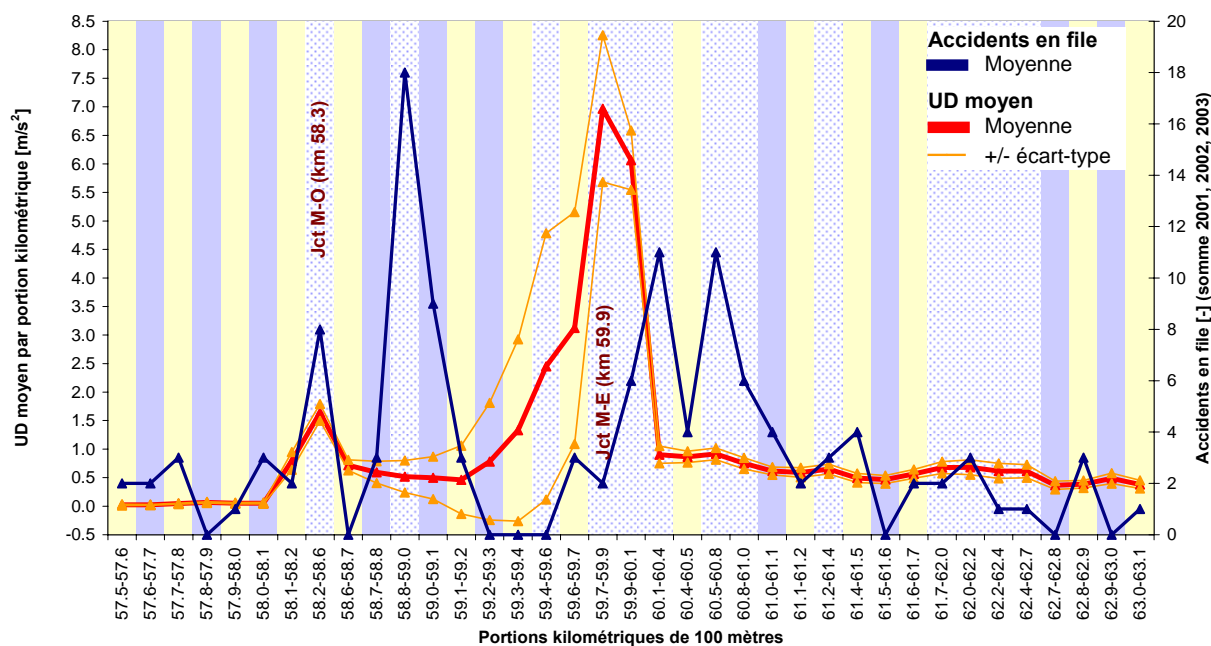


Figure 26 : Comparaison entre la densité d'insécurité et les statistiques d'accidents en file par portion kilométrique de 100 mètres

Les résultats obtenus, qui se basent sur une densité d'insécurité moyenne calculée sur 50 réplifications et sur la somme des accidents relevés sur trois ans (2001, 2002 et 2003) semblent à première vue indiquer une discordance entre les statistiques d'accidents en file et la densité d'insécurité par portion kilométrique.

En considérant des portions kilométriques de 1000 mètres (Figure 24), on observe un pic de la densité d'insécurité moyenne se situant entre les deux pics de relevés d'accidents en file. Une situation similaire se retrouve avec des tronçons d'analyse de 500 mètres (Figure 25), avec une courbe de densité d'insécurité qui présente un pic majeur à la portion kilométrique km 59.50 – km 60.00, alors que la distribution moyenne des accidents en file en relève deux de taille quasi identique aux portions kilométriques km 58.50 – km 59.00 et km 60.00 – km 60.50.

Pour des tronçons de 100 mètres (Figure 26), on observe un pic majeur dans la courbe de la densité d'insécurité moyenne et un pic majeur dans la distribution des accidents en file le long du réseau, ces deux pics étant décalés d'environ un kilomètre. Selon le découpage kilométrique considéré, l'évolution de la densité d'insécurité le long du réseau présente donc une structure plus ou moins semblable à celle du relevé des accidents en file, avec toutefois un décalage dans la localisation des tronçons les plus dangereux.

6.1 DENSITÉ D'INSÉCURITÉ ET POINTS NOIRS

Les références temporelles pour la comparaison entre la densité d'insécurité et les statistiques d'accidents en file ne sont de loin pas semblables puisque l'on considère l'heure de pointe pour le calcul de UD et les statistiques d'accidents sur trois ans. Ces relevés réalisés par la police présentent une forte variabilité sur la période de trois ans analysée. On observe par exemple que, à la section km 58.00 – km 59.00, l'année 2002 présente plus du double d'accidents que ceux recensés en 2001 ou en 2003. Cette brusque augmentation du nombre d'accidents une certaine année ne s'explique pas directement, mais incite à réaliser d'autres analyses.

La densité d'insécurité est donc mise en parallèle avec la notion de point noir, définie dans [48] comme « *un endroit délimité du réseau routier où le nombre d'accidents en manifestation plus élevé que celui d'endroits comparables, dans le sens où le nombre d'accidents exprimé par un indicateur caractéristique dépasse un certain seuil* ».

Pour chaque année d'analyse, soit 2001, 2002 et 2003, la densité moyenne d'accidents en file est donc déterminée par portion de 500 mètres ⁵, pour être ensuite comparée avec la densité critique d'accidents, définie selon [48] comme suit :

$$U_{d,krit} = U_{d,m} + k \cdot \sqrt{\frac{U_{d,m}}{T \cdot L_i}} - \frac{1}{2 \cdot L_i \cdot T} \quad [\text{accidents/km} \cdot \text{an}] \quad (\text{Équation 8})$$

Avec

$$U_{d,m} = \frac{\sum Z_i}{\sum L_i} \quad [\text{accidents/km}] : \text{densité moyenne des accidents d'un tronçon}$$

Z_i [accidents] : nombre des accidents par intervalle i durant une période T
 L_i [km] : longueur des intervalles i
 $k = 1.645$ [-] : pour une probabilité d'erreur de 5%

La détermination de la densité critique d'accidents permet de tracer, pour chaque année d'analyse, un graphique présentant la densité d'accidents en file, la valeur de la densité critique, ainsi que la courbe de la densité d'insécurité moyenne sur 50 répliques (Figure 27). Selon [48], lorsque la densité moyenne d'accidents en file dépasse la densité d'accidents critique, un point noir est décelé.

Le but de la densité d'insécurité n'est pas de se focaliser sur les seuls points noirs, mais de révéler les tronçons de route potentiellement les plus dangereux. En considérant des seuils à 90%, 80%, 70%, 60% puis 50% de la densité critique d'accidents, on peut ainsi définir des tronçons de route ne pouvant certes pas être classifiés comme points noirs, mais présentant néanmoins un nombre important d'accidents. On obtient ainsi une image de l'occurrence des accidents sur les différents tronçons du réseau, élément important pour l'évaluation de la dangerosité du réseau.

⁵ Des portions kilométriques de 500 mètres sont retenues ici, de manière à satisfaire aux critères de subdivision du réseau routier en intervalles définis dans [48], Chapitre 6, page 5.

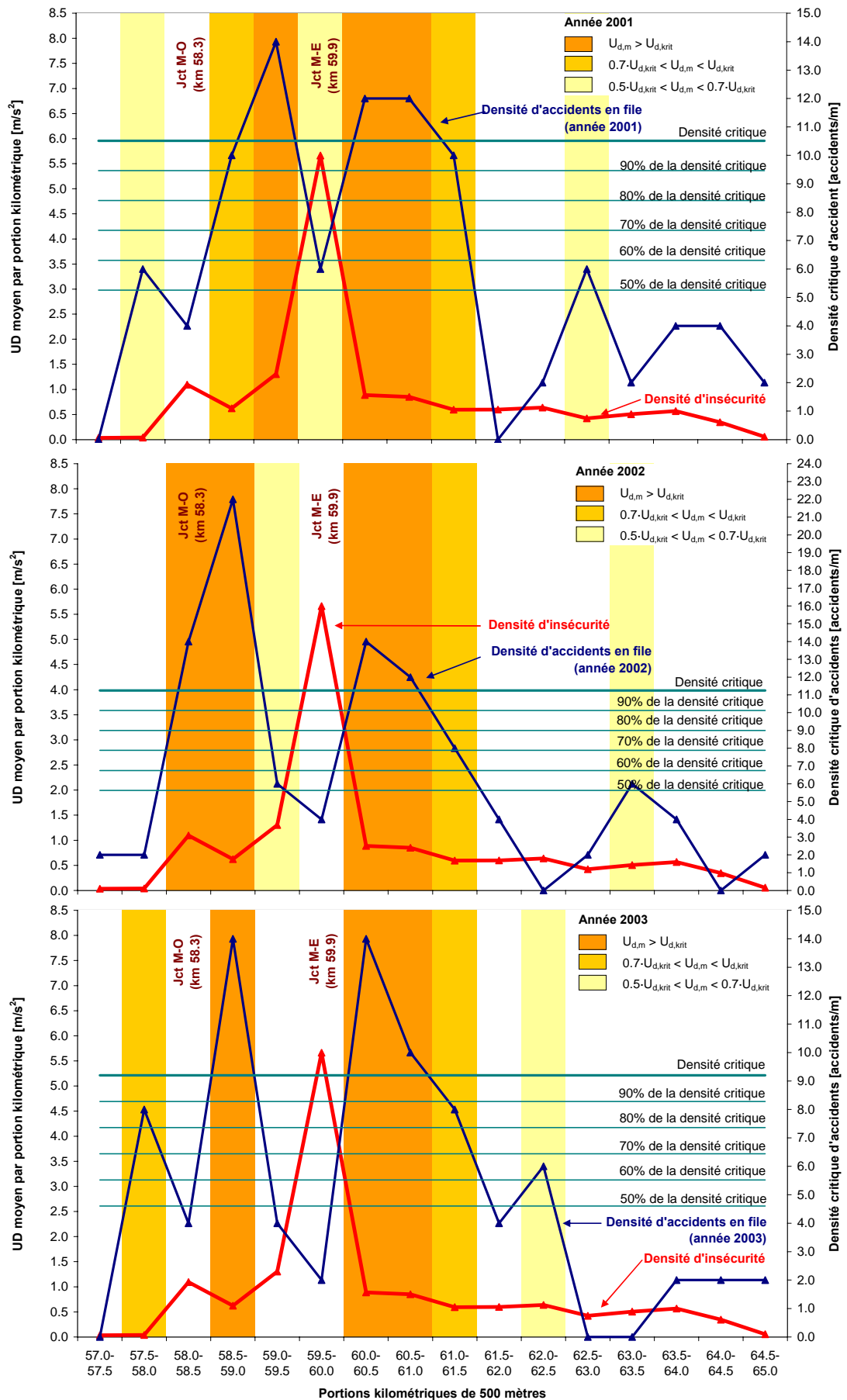


Figure 27 : Comparaison entre la densité d'insécurité, la densité moyenne d'accidents et la densité critique d'accidents (années 2001, 2002 et 2003)

L'analyse de la densité d'accidents survenus durant les années 2002, 2003 et 2004 permet de constater que, malgré une forte variabilité des statistiques d'accidents en file (Figure 25), la localisation des sections présentant une forte occurrence dans les accidents est quasi identique. Il existe certes quelques différences d'une année à l'autre, mais on peut dire que globalement et pour autant que l'on reste à un niveau « macroscopique⁶», une forte concentration d'accidents survient chaque année dans la portion kilométrique km 58.50 – km 61.00 avec, dès le kilomètre km 61.50, une diminution significative de cette concentration. Cette analyse « macroscopique» de la densité d'accidents permet donc de relever une concordance entre les accidents en file observés entre 2001 et 2003 et la densité d'insécurité moyenne de l'heure de pointe du matin, puisque la courbe UD présente un pic fortement marqué dans la zone où l'on relève une forte concentration d'accidents (Figure 27).

Le nouvel indicateur de densité d'insécurité semble donc apte à donner une information valable au sujet de la dangerosité d'un réseau, pour autant que l'analyse des résultats se fasse à un niveau macroscopique.

⁶ Le terme analyse macroscopique est employé ici dans le sens où l'on observe des portions kilométriques de taille importante, soit une zone comprenant largement les deux jonctions Morges-Ouest et Morges-Est.

7 RECOMMANDATIONS ET LIMITES DE L'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ DU TRAFIC PAR MICROSIMULATION

Le travail de recherche mené permet de démontrer les potentialités d'utilisation de l'outil de microsimulation pour l'évaluation de la sécurité routière, tout en identifiant les forces et faiblesses d'une telle approche.

7.1 LIMITATIONS DU PARAMÈTRE UD

Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude de cas montrent que la densité d'insécurité permet de renseigner sur la dangerosité d'un réseau, dans certaines conditions restrictives.

- le nouveau paramètre d'insécurité ne renseigne que sur les accidents en file, tous les autres types d'accidents n'étant pas pris en compte dans le calcul de la densité d'insécurité. Les sorties de route, les accidents avec les cycles ou piétons ainsi que les collisions aux carrefours sont ignorés. Le champ d'application du paramètre UD se borne donc aux sections en voie courante, sans intersections. Il est ainsi particulièrement bien adapté à l'étude des routes à grand débit (autoroutes principalement).

Cela peut paraître trop restrictif de se borner aux seuls accidents en file pour l'évaluation de la dangerosité des réseaux routiers. Néanmoins, si l'on observe les statistiques d'accidents, on se rend compte que ce type d'accidents représente plus de 20% du total des accidents recensés en 2004 (4% des accidents mortels, 9% des accidents avec blessés graves et 25% des accidents avec blessés légers)⁷. Malgré son cadre restrictif, la notion de densité d'insécurité considère donc une part non négligeable des accidents.

- comme déjà mentionné précédemment (Chapitre 6.1), la validité de la densité d'insécurité se limite à l'échelle macroscopique. Pour des portions kilométriques de l'ordre du kilomètre voire moins, les résultats de l'étude de cas montrent un décalage spatial important entre la courbe de la densité d'insécurité et les statistiques d'accidents, ne permettant pas une évaluation de la dangerosité des sections étudiées. La densité d'insécurité permet la localisation d'une portion de route plus dangereuse que le reste du réseau, mais ne reproduit aucunement la distribution exacte des accidents.

⁷ Source : Office fédéral de la statistique, « Accidents de la circulation routière en Suisse – Statistiques 2004 », Neuchâtel 2005.

La présente étude ne constitue qu'une première étape dont le but est surtout destiné à démontrer la potentialité et les possibilités offertes par la microsimulation pour l'analyse de sécurité grâce à un nouvel indicateur. L'objectif est pleinement atteint dans le sens où les limites de validité et le champ d'application de la densité d'insécurité ont pu clairement être identifiés, tout en permettant de mettre en avant certaines problématiques qu'il s'agira de traiter dans de futurs travaux.

7.2 PROBLÈMES SOULEVÉS

Les deux problématiques majeures soulevées après analyse des résultats sont celles inhérentes à l'étude de cas ayant servi à la validation du paramètre UD ainsi qu'à la microsimulation elle-même, et plus particulièrement la modélisation utilisée pour représenter le comportement individuel des véhicules.

7.2.1 Problématique de la modélisation du comportement de l'utilisateur

La plupart des microsimulateurs de trafic modélisent le comportement des véhicules à partir des modèles principaux de poursuite, de changement de voie et d'acceptation de créneau.

a) Problématique du modèle de poursuite

Le modèle de poursuite utilisé par le logiciel Aimsun NG est basé sur un développement ad hoc du modèle empirique de Gibbs [17]. Les paramètres du modèle ne sont pas globaux mais locaux, dépendant notamment du type de véhicule considéré, de la géométrie de la section ou encore des véhicules se trouvant sur les voies adjacentes. De manière générale, le modèle de Gibbs est basé sur deux composantes principales qui sont :

- l'accélération, qui représente l'intention d'un véhicule d'atteindre sa vitesse désirée ⁸
- la décélération, qui représente les limitations imposées à un véhicule par son prédécesseur lorsque celui-ci cherche à atteindre sa vitesse désirée

La vitesse maximale à laquelle un véhicule n peut accélérer durant une période de temps $(t, t+T)$ est ainsi donnée par l'équation suivante :

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5 \cdot a(n) \cdot T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \cdot \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}}$$

Avec

$V(n, t)$ [m/s] : vitesse du véhicule n au temps t

$V^*(n)$ [m/s] : vitesse désirée du véhicule n sur la section courante

$a(n)$ [m/s²] : accélération maximum du véhicule n

T [s] : temps de réaction = intervalle de mise à jour = pas de simulation

Parallèlement, la vitesse maximale pouvant être atteinte par le même véhicule n durant la même période de temps $(t, t+T)$, en fonction de ses propres caractéristiques et des limitations imposées par la présence d'un véhicule de tête $n-1$, est la suivante :

$$V_b(n, t + T) = d(n) \cdot T + \sqrt{d(n)^2 \cdot T^2 - d(n) \cdot \left[2 \cdot (x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)) - V(n, t) \cdot T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]}$$

⁸ La vitesse désirée est définie comme étant celle visée par le conducteur, fonction de la vitesse intrinsèque désirée et de la vitesse suggérée sur la section empruntée.

Avec

$d(n)$ [m/s^2] : décélération maximale (freinage d'urgence) du véhicule n

$x(n,t)$ [m] : position du véhicule n au temps t

$x(n-1,t)$ [m] : position du véhicule de tête $n-1$ au temps t

$s(n-1)$ [m] : longueur effective du véhicule de tête $n-1$

$d'(n-1)$ [m/s^2] : estimation de la décélération du véhicule de tête $n-1$

Ainsi, la vitesse du véhicule n durant l'intervalle de temps $(t, t+T)$ est donnée par la valeur minimale des deux vitesses définies précédemment, soit :

$$V(n, t + T) = \min\{V_a(n, t + T), V_b(n, t + T)\}$$

Cette vitesse permet, une fois intégrée dans l'équation de mouvement, de mettre à jour la position du véhicule n sur la section étudiée, à partir de la relation suivante :

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T) \cdot T$$

Cette modélisation du mouvement des véhicules sous-entend que tous les usagers se comportent de manière sécuritaire. Certes, la correction de certains attributs de véhicules peut influencer quelque peu leur niveau d'agressivité, mais la réaction des usagers face aux autres véhicules reste globalement sécuritaire tout au long de la simulation, dans le sens où un conducteur se comportera de telle manière que sa conduite n'engendre jamais de collision avec son prédécesseur. L'aspect de variation du niveau d'attention du conducteur est ainsi totalement négligé, la microsimulation se basant sur un « conducteur-idéal-type » ayant un temps de réaction constant. Ce temps de réaction constant est semblable pour tous les usagers présents dans une même classe de véhicule. Ainsi, la modélisation du comportement ne tient ni compte des différences de conduite d'un usager à l'autre, ni de la variation de la concentration de l'utilisateur due à différents facteurs tels que fatigue, stress, distraction due à une discussion ou un appel téléphonique, alcool et médicaments, etc... Les imperfections de conduite observables sur le terrain sont donc éliminées, rendant la modélisation du comportement des usagers plus sécuritaire qu'elle ne l'est en réalité, et ce même si globalement l'écoulement du trafic est similaire.

La microsimulation ne constitue donc qu'une représentation imparfaite de la réalité, basée sur des hypothèses simplificatrices. Partant de ce constat, on pourrait penser qu'il est totalement illusoire de vouloir réaliser une quelconque évaluation du niveau de dangerosité d'un réseau à partir de la microsimulation. Pourtant, grâce à l'introduction de la densité d'insécurité dans le microsimulateur, on parvient néanmoins à obtenir une information de la dangerosité du réseau face aux collisions en file, en fonction des conditions de trafic.

b) Problématique du modèle d'entrée sur autoroute

Le réseau utilisé dans la présente étude pour la validation du paramètre UD, comprenant un tronçon d'autoroute à deux voies de circulation avec deux entrées autoroutières, constitue un endroit particulier, notamment au niveau du comportement des véhicules qui n'est plus uniquement contrôlé par le modèle de poursuite. L'insertion de véhicules provenant d'une route principale sur un tronçon d'autoroute répond à des conditions bien particulières.

Le véhicule entrant évalue la longueur de voie d'entrée qu'il a à disposition, ainsi que la vitesse de circulation du flux autoroutier. Les véhicules circulant sur l'autoroute contrôlent quant à eux la présence de véhicules entrant pour, si nécessaire, se déplacer sur la voie de gauche et permettre ainsi une insertion plus aisée de ces véhicules. Ces conditions particulières sont prises en considération dans la microsimulation au travers du modèle d'entrée. Avec le développement des nouvelles versions du logiciel Aimsun NG, ce modèle a subi quelques modifications.

Dans la version 3.2 du modèle d'entrée, les véhicules entrant tentent de s'insérer entre les véhicules du flux principal, sans tenir compte de la longueur de voie d'entrée qui leur reste. S'ils n'ont pas pu s'insérer en raison de la forte densité du trafic sur l'autoroute, ils se retrouvent arrêtés à l'extrémité de la voie d'entrée. Leur insertion dans un flux circulant à une vitesse importante n'en est alors que plus difficile. Ce comportement n'est que peu réaliste. Dans la réalité, la plupart des automobilistes dans une telle situation dosent leur vitesse, voire s'arrêtent avant la fin de la voie d'entrée pour attendre une possibilité d'insertion. Le restant de la voie d'entrée leur permet alors d'accélérer. Ils peuvent ainsi s'insérer dans le flux principal avec une plus faible différence de vitesse et par conséquent une sécurité plus grande.

Dans la version 4.2.8 du modèle d'entrée, une plus grande quantité de véhicules peut s'insérer dans le flux principal avant la fin de la voie d'entrée. La simulation se rapproche ainsi un peu plus de la réalité.

Le modèle d'entrée contrôle en partie la vitesse et les distances intervéhiculaires aux abords des entrées d'autoroutes. Les modifications apportées au niveau de l'algorithme du modèle d'entrée influencent donc directement la densité d'insécurité. On se retrouve donc une nouvelle fois confronté à la problématique de représentativité de la microsimulation en terme de comportement des usagers et donc en terme de sécurité.

Il s'agira donc par la suite de toujours rester conscient du fait que la microsimulation n'est qu'une représentation de la réalité, pour tenter d'améliorer la qualité représentative de la densité d'insécurité en modifiant les modèles de comportement (modèle de poursuite, de changement de voie et d'entrée sur l'autoroute notamment) de manière à pouvoir reproduire au plus près le comportement réel des usagers.

7.2.2 Problématique de l'étude de cas

L'étude de cas ayant servi à la validation du paramètre d'insécurité présente certaines « caractéristiques » qui peuvent ne pas être sans conséquence sur les résultats obtenus. Relever ces éléments constitue donc un point primordial de cette première étude si l'on veut pouvoir mieux apprécier la qualité de la densité d'insécurité, voire éventuellement corriger et améliorer ce nouvel indicateur de sécurité.

Les « caractéristiques critiques » de l'étude de cas traitée dans la présente recherche sont les suivantes :

- *modélisation du réseau* : comme la densité d'insécurité nécessite une décomposition par portion kilométrique, il s'agit de se demander si la modélisation du réseau étudié par microsimulation est suffisamment fine pour permettre une bonne analyse de la situation.

Le réseau étudié dans le cas présent, qui rappelons-le provient d'une précédente étude réalisée au sein du Laboratoire des voies de circulation (EPFL – LAVOC), est constitué par des portions de route d'une grandeur qui varie de 60 à 440 mètres. Il n'y a donc pas d'homogénéité dans la taille des sections modélisées. Les analyses par portion kilométrique de 500 et 1000 mètres proviennent ainsi d'une agrégation sur plusieurs sections de route, alors que celle considérant des tronçons de 100 mètres n'est que partielle.

Idéalement, une modélisation d'un réseau devrait être constituée de tronçons de faible dimension et d'une longueur unique. Il s'agirait donc, pour vérifier l'influence de la finesse de la modélisation, de réaliser d'autres études de cas avec un réseau de Morges affiné, avec des sections constantes d'une plus petite dimension.

- *calibration* : de manière générale, on considère que la calibration d'un réseau est achevée lorsque la microsimulation reproduit la réalité d'une situation d'une manière jugée suffisamment semblable pour être acceptable et représentative.

Dans la présente recherche, aucun travail de calibration particulier n'est réalisé. L'étude de cas utilisée se base sur un réseau modélisé existant et déjà calibré [37]. Dans le cadre du projet PAPABILES, un travail de calibration conséquent a été effectué, en considérant aussi bien une étude paramétrique sur les attributs des véhicules qu'une étude des paramètres globaux sur l'ensemble du réseau ou locaux de certaines sections [33]. Au niveau local, la validation du modèle s'est faite principalement sur la base d'une comparaison entre les débits et vitesses moyennes (sur 10 répliques) fournis par la microsimulation et les valeurs obtenues grâce à des caméras de comptages disposées sur le terrain juste avant la jonction de Morges-Est (Figure 28). A également été pris en considération le ratio entre le débit enregistré sur la voie de gauche et celui de la voie de droite, toujours au niveau du capteur d'entrée de la jonction Morges-Est.

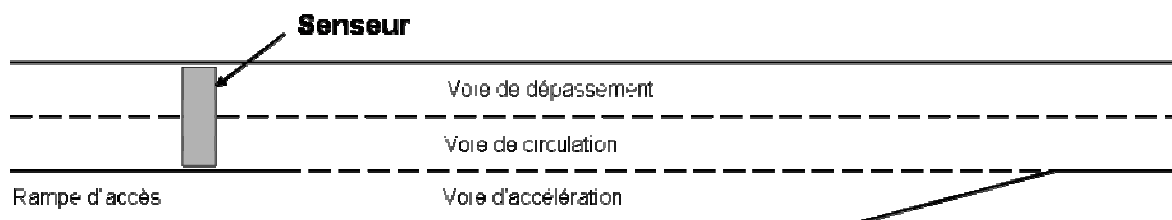


Figure 28 : Localisation du capteur de la jonction Morges-Est servant à la calibration

Pour le projet PAPABILES, la validité de la modélisation a été admise lorsque la courbe des valeurs des vitesses et débits moyens in situ se situait dans le domaine des valeurs simulées, moyennées sur 10 répliques. Cette calibration est tout à fait satisfaisante dans le cadre d'une étude de l'influence, en terme d'écoulement de trafic, de la mise en place d'un catalogue de mesures d'aménagement. Cela ne veut cependant pas dire qu'elle est acceptable et suffisante pour traiter d'une autre problématique.

Dans le cadre de la présente étude, on ne s'attèle pas uniquement à l'écoulement macroscopique du trafic, mais au comportement individuel et microscopique des véhicules. Un travail de calibration plus assidu et plus concis devrait donc être réalisé. Des indicateurs comme le ratio entre la voie de gauche et celle de droite sont ainsi intéressants et primordiaux dans le calcul de la densité d'insécurité, non pas uniquement à l'entrée de la jonction Morges-Est, mais tout le long du réseau modélisé.

- *données pour la validation de la densité d'insécurité* : la validation du paramètre de densité d'insécurité s'est faite ici en comparant les valeurs de UD obtenues avec les statistiques d'accidents en file recensées durant les années 2002, 2003 et 2004. Pour être totalement rigoureuse, cette validation devrait se faire à partir d'un échantillon de données exhaustives suffisamment importantes pour être représentatives.

Dans le cas présent, les données récoltées ne sont de loin pas exhaustives, puisqu'elles proviennent des constats de police réalisés durant trois ans sur la portion autoroutière de Morges. Certains accidents, non déclarés officiellement, ne figurent donc pas dans la base de données, alors que certains autres sont faussement introduits ou rejetés de celle-ci par manque d'information. Il est en effet parfois difficile de reconstituer exactement le déroulement d'un accident et de savoir s'il s'agit bien d'une collision en file à partir des seules informations abrégées figurant dans le rapport de police.

Les accidents non déclarés constituent quant à eux des cas dont les conséquences sont limitées, dans le sens où aucun blessure majeure n'est à déplorer. L'influence de ces accidents sur la densité d'insécurité est donc restreinte. La non exhaustivité parfaite des statistiques d'accidents en file ne doit ainsi jamais être perdue de vue, sans pour autant totalement remettre en question le travail de validation du paramètre UD, qui doit se limiter à une comparaison assez grossière et non en la recherche d'une corrélation parfaite entre les deux indicateurs.

Une autre problématique entachée au travail de validation de la densité d'insécurité est celle de la concordance temporelle des indicateurs utilisés. Dans le cas présent, les références temporelles de la microsimulation diffèrent fortement de celles des statistiques d'accidents. La matrice Origine-Destination utilisée correspond à un relevé sur le terrain effectué le mardi 2 novembre 1999 de 7h00 à 8h00. La microsimulation fournit donc une représentation de l'heure de pointe du matin d'un jour de semaine de l'automne 1999. La référence temporelle des données pour la validation de la densité d'insécurité est, quant à elle, toute autre. La validation du paramètre UD s'est faite par comparaison avec une agrégation des accidents durant 3 ans et durant toute la journée. Or, si l'on observe la répartition temporelle des accidents en file, on se rend compte qu'elle est loin d'être homogène, avec la présence de deux pics principaux, dont celui du soir est plus de deux fois supérieur à celui du matin, et ce quelque soit l'année considérée (Figure 29).

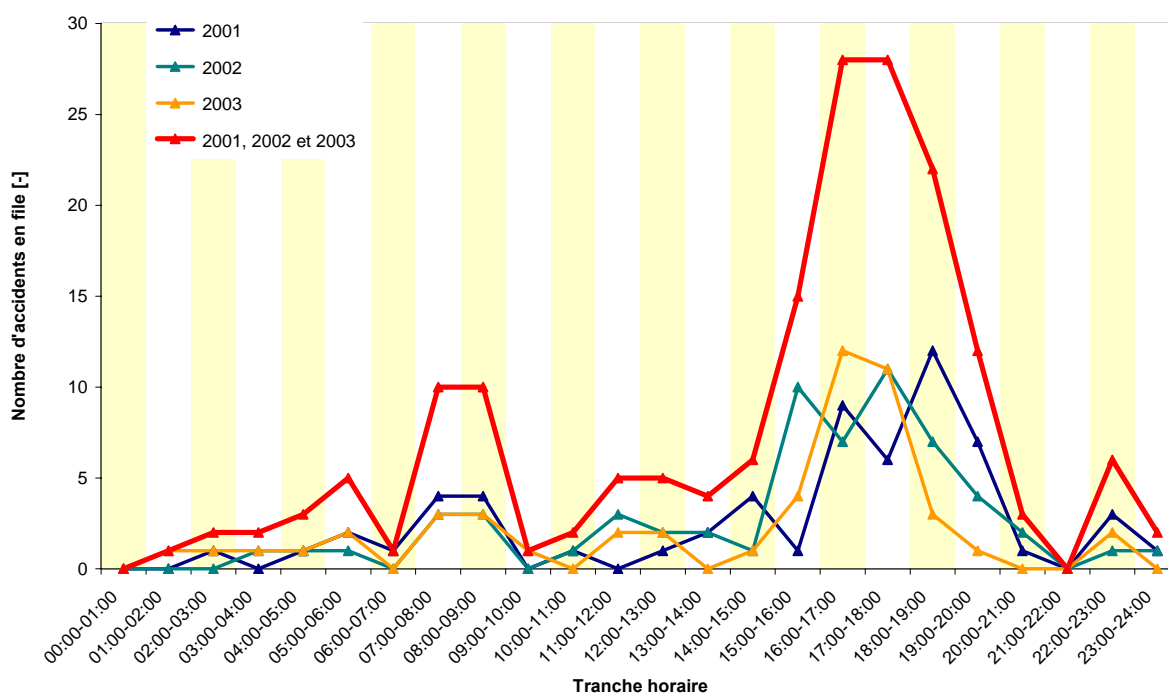


Figure 29 : Répartition temporelle des accidents en file recensés dans les rapports de police durant les années 2001, 2002 et 2003

Des constatations similaires de non homogénéité des accidents dans le temps peuvent être faites si l'on considère les différents jours de la semaine, la structure du trafic n'étant de loin pas semblable un jour du week-end, un jour le précédent ou le suivant, ou alors un jour au milieu de la semaine.

Si l'on voulait être totalement conséquent, il s'agirait de mieux faire correspondre les références temporelles de la simulation et des statistiques d'accidents. Les données servant de base à la validation de la densité d'insécurité devraient être mieux filtrées selon leur heure et jour d'occurrence, avec toutefois la contrainte de constituer un échantillon suffisamment représentatif. Dans le cas où le nombre d'accidents recensés n'est pas suffisant, on pourrait également imaginer d'étendre la période de simulation (par exemple de 6h00 à 9h00 dans le cas de Morges traité ici) et de considérer les accidents recensés durant la période correspondante.

Des études futures permettront de définir qu'elles références temporelles sont les plus à même de fournir les meilleurs résultats, sachant que le but du paramètre UD est de renseigner sur la dangerosité des sections d'un réseau en fonction des conditions de trafic.

Remarque : comme la densité d'insécurité ne vise qu'à renseigner sur la dangerosité d'un réseau due aux conditions de trafic, il s'agirait, pour être totalement cohérent, d'éliminer également tous les accidents imputables à de mauvaises conditions météorologiques, aux capacités physiques du conducteur ou encore à des défaillances techniques, bref tous les accidents liés directement aux conditions de circulation.

7.3 PERSPECTIVES

Une première phase de validation du concept de la densité d'insécurité et son exploitation par microsimulation est réalisée dans le cadre de cette étude. Il s'agirait par la suite d'étoffer ce travail, en s'attellant à la recherche de solutions des différents problèmes relevés au Chapitre 7.2 (interrogations principalement soulevées par la modélisation du comportement des usagers dans la microsimulation et par l'étude de cas de Morges), ainsi qu'à l'étude approfondie d'autres problématiques, notamment :

- *équation de la densité d'insécurité* : la notion de densité d'insécurité fait intervenir trois paramètres principaux (R_d , ΔS et S). En première approche, une équation multiplicative simple (avec des coefficients α , β , γ égaux à 1) a été considérée. Une étude de sensibilité des différents paramètres permettrait de modifier et d'éventuellement améliorer l'équation de la densité d'insécurité.
- *indépendance du lieu* : la validation de la densité d'insécurité se base ici sur les résultats obtenus à partir d'une seule et unique étude de cas. Il s'agirait donc, dans de futurs travaux, de recourir à d'autres études de cas pour garantir l'indépendance du lieu de la notion de densité d'insécurité. Il s'agirait ainsi de s'assurer que le paramètre UD permet bien d'évaluer la dangerosité d'un réseau quel qu'il soit⁹, et pas uniquement celui du cas précis de Morges.
- *influence du temps de réaction* : il est admis dans la présente étude un temps de réaction du véhicule suiveur égal à 2 secondes, valeur en accord avec les Normes suisses. Comme le temps de réaction standard est différent d'un pays à l'autre, il serait intéressant d'étudier l'influence du temps de réaction sur les valeurs de la densité d'insécurité.

⁹ On entend ici par un « réseau quel qu'il soit », un réseau routier qui présente des caractéristiques en relation avec les limitations de la notion de densité d'insécurité, soit un réseau constitué principalement de routes à grand débit.

8 CONCLUSIONS

Pour l'évaluation de la sécurité d'un flux de véhicules circulant en file, la présente étude propose d'utiliser la densité d'insécurité. Celle-ci fait intervenir le scénario d'une hypothétique collision. Cette notion permet de détecter par microsimulation les situations critiques où, après un freinage d'urgence du véhicule de tête, le véhicule suiveur dispose d'un trop faible espace pour s'arrêter avant de le percuter, ce malgré son freinage d'urgence après un temps de réaction standard. Une fois cette situation potentiellement critique relevée, on peut alors calculer l'insécurité U de ce couple de véhicule en prenant en considération le rapport R_d entre la décélération réelle du véhicule de tête et celle maximale théorique du véhicule suiveur, la différence de vitesse ΔS des deux véhicules ainsi que la vitesse S du véhicule suiveur, cela au moment du choc hypothétique. La sommation pondérée des valeurs de l'insécurité de l'ensemble des couples de véhicules permet finalement d'obtenir la densité d'insécurité UD sur chacune des sections formant le réseau, et ce pour chaque période d'agrégation. On dispose ainsi d'une « carte de dangerosité » des différentes sections du réseau, en fonction des conditions de trafic.

Comme le paramètre UD découle de la notion de scénario d'une hypothétique collision, les hypothèses inhérentes à la densité d'insécurité correspondent au niveau de modélisation du comportement des usagers, avec un temps de réaction standard et constant des conducteurs (Figure 30).

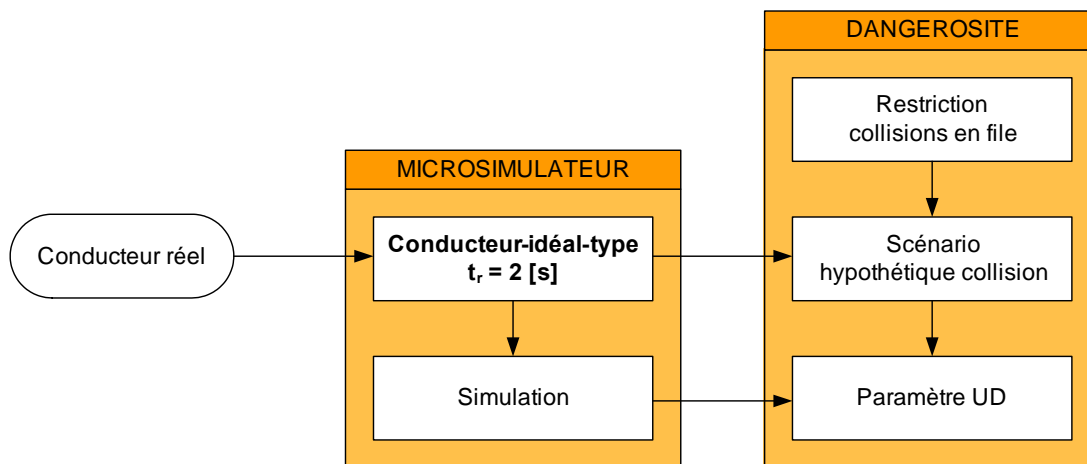


Figure 30 : Prise en compte du comportement du conducteur dans la microsimulation pour la détermination de la dangerosité d'un réseau

Par conséquent, et bien que la microsimulation ne reproduise pas exactement et totalement le comportement réel des usagers face à leur prédécesseur, celle-ci permet, une fois couplée avec la notion de densité d'insécurité, de produire un élément d'évaluation de la dangerosité d'un réseau. Certes, cet élément ne permet pas une évaluation précise de la dangerosité globale d'un réseau, puisqu'il ne se base que sur les accidents en file pouvant survenir entre deux véhicules se suivant et qu'il considère un conducteur-idéal-type. Néanmoins, il permet d'obtenir une indication de l'influence des conditions de trafic sur la sécurité face aux collisions en file.

Les résultats obtenus sont encourageants. Le travail de recherche mené a atteint ses objectifs en démontrant les potentialités de la microsimulation pour une analyse active de la sécurité routière. L'évolution spatiale et temporelle de la densité d'insécurité permet de localiser, selon les conditions de trafic, des sections de route plus dangereuses en terme de collisions en file que d'autres. Des études complémentaires permettront d'affiner des paramètres sensibles, notamment le niveau d'agrégation spatiale dont l'importance est mise en évidence au travers de l'étude de cas de Morges. Le nouvel indicateur pourra ainsi être amélioré.

A ce stade, la densité d'insécurité semble être un nouvel indicateur de sécurité au potentiel de développement intéressant. Considérée parallèlement aux indicateurs classiques de performance, elle permet une évaluation plus globale des différentes stratégies de gestion du réseau existant. Elle souligne la différence au niveau de la sécurité routière entre une situation avec trafic fluide ou congestionné, élément ne pouvant pas être mis en évidence par les seules données macroscopiques traditionnelles (telles la vitesse ou le flux) fournies par les actuels outils de microsimulation. La densité d'insécurité constitue de plus un outil d'appréciation de la sécurité lors de la conception de nouveaux tracés, lançant les premières bases d'une analyse de sécurité active.

Lausanne, le 18 décembre 2005

Frédérique Huguenin

9 ANNEXES

ANNEXE 1 :	Algorithme du calcul de la densité d'insécurité.....	48
ANNEXE 2 :	Evolution temporelle du paramètre R_d au km 59.00.....	60
ANNEXE 3 :	Evolution temporelle de l'insécurité au km 59.00.....	63
ANNEXE 4 :	a) Evolution de R_d par réplication au km 59.00.....	66
	b) Evolution de ΔS par réplication au km 59.00.....	69
	c) Evolution de S par réplication au km 59.00.....	72
	d) Evolution de UD par réplication au km 59.00.....	75

ANNEXE 1 : Algorithme du calcul de la densité d'insécurité (fichiers GetramExtVisual)

a) Fichier GetExt.cxx

```
#if __GNUG__ >= 2
# pragma implementation
#endif

#pragma warning (disable:4786)
#include "GetExt.h"
#include "GetExt_common.h"
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "Vehicle.h"
#include "util.h"
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
using namespace std;

VehicleContainer vehcontainer;
VehicleContainer* pvehc = &vehcontainer;
float* ptotal_safety = 0;
float* pmean_safety = 0;
float* tabidsection;
float** presults = 0;
int nbsection;
float interval; // Intervalle d'agrégation des détecteurs
float timeint;
char cadena [1024];
char Tab = '\t';
float simtime;
int nbinterval;
int index_interval;
float reactiontime;
float alpha;
float beta;
float gama;
char* network_name = AKIInfNetGetNetworkPath();
char* odmatrix_name = AKIInfNetGetODMatrixName();

ofstream fichier2 ("C:\\safety.txt",ios::out); // Fichier de stockage des données
ofstream fichierdata ("C:\\safety_data.txt",ios::out);

int GetExtLoad()
{
    fichierdata<<"timeSta"<<Tab<<"Leader"<<Tab<<"Follower"<<Tab<<"idsection"<<Tab<<"safety"<<Tab<<"R
D"<<Tab<<"DV"<<Tab<<"V"<<Tab<<"Decel_l"<<Tab<<"avant"<<Tab<<"maintenant"<<Tab<<"headway"<<
Tab<<"seheadway"<<Tab<<"C"<<Tab<<"CH"<         <<endl;
    if( InitGetExtSystem() )
    { // Initialisation réussie
        if (!fichier2)
        {
```

```
        sprintf(cadena, "faute à l'ouverture du fichier2 en écriture");
        AKIPrintString(cadena);
    } // Test de la bonne ouverture du fichier
    else
    {
        sprintf(cadena, "ouverture du fichier2 en écriture ok");
        AKIPrintString(cadena);
    }
    return 0;
}
else
{ // Initialisation GetExt manquée
    return -1;
}
}

int GetExtInit()
{
    if( InitGetExtSystem() )
    { // Initialisation réussie
        interval = AKIEstGetIntervalStatistics();
        timeint = interval;
        vehcontainer.Reset();
        nbsection = AKIInfNetNbSections();
        index_interval = 0;

        // Variables pouvant être modifiées
        reactiontime = 2.0; // Temps de réaction du véhicule suiveur (différent de celui d'Aimsun)
        alpha = 1; // Puissance pour le rapport accélération du véhicule de tête / décélération maximale du
        // véhicule suiveur
        beta = 1; // Puissance pour la différence de vitesse au moment de l'hypothétique collision
        gama = 1; // Puissance pour la vitesse du véhicule suiveur au moment de l'hypothétique collision

        sprintf(cadena, "Le nombre de section est de %d et l'intervalle d'agrégation est de %f secondes",
        nbsection, interval);
        AKIPrintString(cadena);
        sprintf(cadena, "Le nom du réseau est %s et la matrice utilisée est %s", network_name,
        odmatrix_name);
        AKIPrintString(cadena);

        ptotal_safety = new float [nbsection];
        pmean_safety = new float [nbsection];
        tabidsection = new float [nbsection];
        simtime = AKIGetEndSimTime() - AKIGetIniSimTime();
        double arrondi;
        arrondi = floor(simtime/interval);
        nbinterval = arrondi; // Calcul du nombre d'intervalles
        presults = new float* [nbsection]; // Tableau des pointeurs de chaque ligne de résultats (une ligne = un
        // link)

        int n;
        for (n=0; n<nbsection; n++) // Initialisation des tableaux et du texte
        {
            *(ptotal_safety + n) = 0;
            *(pmean_safety + n) = 0;
            *(tabidsection + n) = AKIInfNetGetSectionId(n);
        }
    }
}
```

```
        float* toto = new float [nbinterval];
        int i;
        for (i=0; i< nbinterval; i++)
        {
            *(toto + i) = 0;
        }
        *(presults + n) = toto;
    }
    return 0;
}
else
{ // Initialisation GetExt manquée
    return -1;
}
}

int GetExtManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
{
    return 0;
}

int GetExtPostManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
{
    if (time >= timTrans)
    {
        int n=0; // Index des sections
        float factheadway = 0;
        float safety = 0;

        while (n < nbsection)
        {
            int idsection = AKIInfNetGetSectionId(n);
            int nbvehicle = AKIVehStateGetNbVehiclesSection(idsection);

            int i = 0;
            while (i < nbvehicle - 1)
            {
                float maintenant=-1; float avant=-1;
                float decel_l = GetDeceleration(i, idsection, pvehc, acicle,&maintenant,&avant);

                if (nbvehicle>1)
                {
                    float headway = GetVehHeadway(i+1, idsection);
                    int cas=-1;
                    float secheadway = GetVehSecurityHeadway(i+1, idsection, reactiontime, &cas);
                    Vitesses* vit= new Vitesses;

                    StaticInfVeh vehstatdata_l = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, i);
                    StaticInfVeh vehstatdata_f = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, i+1);
                    float maxdecel_f = fabs(vehstatdata_f.maxDeceleration);
                    float rapport_headway = (headway/secheadway);
                    if (headway != 0 && secheadway != -1 && secheadway != 0 && decel_l > 0 &&
                        vehstatdata_l.report == 0 && rapport_headway < 1)
                    {
                        GetVehSpeedCrash(i+1, idsection, reactiontime, vit);
                        if (vit->vitesse_f > 0 && vit->vitesse_crash > 0)

```

```

        {
            float V=(*vit).vitesse_f;
            float DV=(*vit).vitesse_crash;
            float RD=(1*(decel_l/maxdecel_f));
            int C=(*vit).cas;
            int CH=cas;

            // La fonction du paramètre d'insécurité
            safety = pow(RD,alpha) * pow(DV, beta) * (pow(V, gama));

            fichierdata<<timeSta<<Tab<<vehstatdata_l.idVeh<<Tab<<vehstatdata_f.id
            Veh<<Tab<<idsection<<Tab<<safety<<Tab<<V<<Tab<<DV<<Tab<<RD<<
            Tab<<decel_l<<Tab<<avant<<Tab<<maintenant<<Tab<<headway<<Tab<<
            seheadway<<Tab<<C<<Tab<<CH<<endl;

        }
        else
        {
            safety = 0;
        }
        *(ptotal_safety + n) += safety;
    }
    delete vit;
}
i++;
}
n++;
}
vehcontainer.Compress();
ContainerInit(nbsection, pvehc);

if ((time-timTrans) > (timeint-acicle))
{
    for (n=0; n < nbsection; n++)
    {
        int idsection = AKIInfNetGetSectionId(n);
        A2KSectionInf section = AKIInfNetGetSectionInf(idsection);
        float longsection = section.length;
        *(pmean_safety + n) = ((*ptotal_safety + n)) / longsection)/interval;
        *(ptotal_safety + n) = 0;
        *((*(presults + n)) + index_interval) = *(pmean_safety + n);
    }
    timeint = timeint + interval;
    index_interval ++;
}
}
return 0;
}

int GetExtFinish()
{
    fichier2 << "Network: " << network_name << Tab << "OD Matrix: " << odmatrix_name << endl;
    fichier2 << "SafeReactionTime: " << reactiontime << " alpha-beta-gama: " << alpha <<"-"<< beta <<"-"<<
    gama << endl;
    fichier2 << endl;
    int n, i;
    for (n=0; n < nbsection; n++)

```



```
{
    fichier2 << *(tabidsection + n);
    for (i=0; i < nbinterval; i++)
    {
        fichier2 << Tab << *((presults + n) + i);
    }
    fichier2 << endl;
}
fichier2 << endl;

delete [] ptotal_safety;
delete [] pmean_safety;
delete [] tabidsection;
delete [] presults;
sprintf(cadena, "FIN");
AKIPrintString(cadena);
return 0;
}
```

int GetExtUnLoad()

```
{
    fichier2.close();
    fichierdata.close();
    sprintf(cadena, "Fermeture du fichier safety3.dat");
    AKIPrintString(cadena);
    return 0;
}
```

b) Fichier GetExt.h

```
#ifndef _GetExt_h_
#define _GetExt_h_
#define DLLE __declspec(dllexport)

extern "C"
{
    DLLE int GetExtLoad();
    DLLE int GetExtInit();
    DLLE int GetExtManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle);
    DLLE int GetExtPostManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle);
    DLLE int GetExtFinish();
    DLLE int GetExtUnLoad();
}
#endif
```

c) Fichier util.cpp

```
#include "GetExt_common.h"
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "Vehicle.h"
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <math.h>
#include "util.h"
using namespace std;
```

```
float GetVehHeadway (int index, int idsection)
{
    InfVeh vehdyndata_f = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index);
    InfVeh vehdyndata_l = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index-1);
    StaticInfVeh vehstatdata_l = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, index-1);

    if (vehdyndata_f.numberLane == vehdyndata_l.numberLane && vehdyndata_l.report == 0)
    {
        float delta1 = (vehdyndata_l.CurrentPos - vehdyndata_f.CurrentPos);
        float delta = delta1 - vehstatdata_l.length;

        if (vehdyndata_f.CurrentSpeed > 0)
        {
            float headway = delta / (vehdyndata_f.CurrentSpeed / 3.6);
            return headway;
        }
        else
        {
            return 0;
        }
    }
    else
    {
        return 0;
    }
}

float GetVehSecurityHeadway (int index, int idsection, float tr, int* pcas)
{
    InfVeh vehdyndata_f = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index);
    InfVeh vehdyndata_l = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index-1);
    StaticInfVeh vehstatdata_f = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, index);
    StaticInfVeh vehstatdata_l = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, index-1);

    if (vehdyndata_l.report == 0 && vehdyndata_f.numberLane == vehdyndata_l.numberLane)
    {
        float va = (vehdyndata_f.CurrentSpeed/3.6);
        float vb = (vehdyndata_l.CurrentSpeed/3.6);
        float da = fabs(vehstatdata_f.maxDeceleration);
        float db = fabs(vehstatdata_l.maxDeceleration);
        float dist1 = ((da*da*tr*tr) - (da*db*tr*tr) - ((vb - da*tr - va)*(vb - da*tr - va)))/(2*db-2*da);
        float dist2 = va*tr + 0.5*((va*va/da)-(vb*vb/db));
        float dist;

        if (dist1 > dist2)
        {
            dist = dist1 - vehstatdata_l.length;
            *pcas=1;
        }
        else
        {
            dist = dist2 - vehstatdata_l.length;
            *pcas=2;
        }
        if (dist < 0)
    }
}
```

```
        {
            dist = 0;
        }
        if (va != 0)
        {
            float secheadway = dist/va;
            return secheadway;
        }
        else
        {
            return -1;
        }
    }
    else
    {
        return -1;
    }
}

float GetDeceleration (int index, int idsection, VehicleContainer* pvehc, float acicle, float* pm, float* pa)
{
    if(index<0) AKIPrintString("Appel a index<0");
    InfVeh vehdyndata = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index);
    int idveh = vehdyndata.idVeh;
    float speed = vehdyndata.CurrentSpeed;*pm=speed;
    float deceleration = 0;
    Vehicle* veh = (*pvehc).Get(idveh);

    if (veh != NULL)
    {
        float prevspeed = (*veh).GetSpeed();*pa=prevspeed;
        deceleration = ((prevspeed - speed) / acicle)/3.6;
        if (deceleration < 0) deceleration = 0;
    }
    else
    {
        (*pvehc).Add(idveh,speed);
        deceleration = 0;
    }
    return deceleration;
}

void ContainerInit (int nbsection, VehicleContainer* pvehc)
{
    int i;
    int n;
    for (n = 0; n < nbsection; n++)
    {
        int idsection = AKIInfNetGetSectionId(n);
        int nbvehicle = AKIVehStateGetNbVehiclesSection(idsection);

        for (i = 0; i < nbvehicle-1; i++)
        {
            InfVeh vehdyndata = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, i);
            int idveh = vehdyndata.idVeh;
            float speed = vehdyndata.CurrentSpeed;
```

```
        Vehicle* veh = (*pvehc).Get(idveh);
        (*veh).SetSpeed(speed);
    }
}

void GetVehSpeedCrash (int index, int idsection, float tr, Vitesses* pvitesses)
{
    InfVeh vehdyndata_f = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index);
    InfVeh vehdyndata_l = AKIVehStateGetVehicleInfSection(idsection, index-1);
    StaticInfVeh vehstatdata_f = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, index);
    StaticInfVeh vehstatdata_l = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(idsection, index-1);
    bool ok=false;

    if (vehdyndata_l.report == 0 && vehdyndata_f.numberLane == vehdyndata_l.numberLane)
    {
        float va = (vehdyndata_f.CurrentSpeed/3.6);
        float vb = (vehdyndata_l.CurrentSpeed/3.6);
        float da = fabs(vehstatdata_f.maxDeceleration);
        float db = fabs(vehstatdata_l.maxDeceleration);
        float delta1 = (vehdyndata_l.CurrentPos - vehdyndata_f.CurrentPos);
        float z = delta1 - vehstatdata_l.length;
        float ta1 = tr;
        float ta2 = (va/da) + tr;
        float tb1 = vb/db;
        float a, b, c, VA, VB;

        // Cas 1-1
        a = -(db/2); b = (vb-vb); c = z;
        float t111 = (-b + sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);
        float t112 = (-b - sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);

        if (t111 >= 0 && t111 <= ta1 && t111 <= tb1 && !ok)
        {
            float VA = va;
            float VB = vb - (db*t111);
            pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
            pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
            pvitesses->cas=1;
            ok=true;
        }
        if (t112 >= 0 && t112 <= ta1 && t112 <= tb1 && !ok)
        {
            VA = va;
            VB = vb - (db*t112);
            pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
            pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
            pvitesses->cas=1;
            ok=true;
        }
    }

    // Cas 2-1
    a = -((da-db)/2); b = ((da*tr)+va-vb); c = -(((da*tr*tr)/2)+z);
    float t211 = (-b + sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);
    float t212 = (-b - sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);
}
```

```
if (t211 > ta1 && t211 <= ta2 && t211 <= tb1 && !ok)
{
    float VA = va - (da*(t211-tr));
    float VB = vb - (db*t211);
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=2;
    ok=true;
}
if (t212 > ta1 && t212 <= ta2 && t212 <= tb1 && !ok)
{
    float VA = va - (da*(t212-tr));
    float VB = vb - (db*t212);
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=2;
    ok=true;
}
```

// Cas 3-1

```
a = -(db/2); b = vb; c = (z-((va*va)/da)/2)-(va*tr));
float t311 = (-b + sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);
float t312 = (-b - sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);
```

```
if (t311 > ta2 && t311 <= tb1 && !ok)
{
    float VA = 0;
    float VB = vb - (db*t311);
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=3;
    ok=true;
}
if (t312 > ta2 && t312 <= tb1 && !ok)
{
    float VA = 0;
    float VB = vb - (db*t312);
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=3;
    ok=true;
}
```

// Cas 1-2

```
float t121 = ((vb*vb)/(2*db*va))+(z/va);
if (t121 >= 0 && t121 <= ta1 && t121 > tb1 && !ok)
{
    float VA = va;
    float VB = 0;
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=4;
    ok=true;
}
```

```
// Cas 2-2
a = -(da/2); b = (da*tr)+va; c = -(((da*(tr*tr))+((vb*vb)/db)+(2*z))/2);
float t221 = (-b + sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);
float t222 = (-b - sqrt((b*b)-(4*a*c)))/(2*a);

if (t221 > ta1 && t221 <= ta2 && t221 > tb1 && !ok)
{
    float VA = va - (da*(t221-tr));
    float VB = 0;
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=5;
    ok=true;
}
if (t222 > ta1 && t222 <= ta2 && t222 > tb1 && !ok)
{
    float VA = va - (da*(t222-tr));
    float VB = 0;
    pvitesses->vitesse_f = VA*3.6;
    pvitesses->vitesse_crash = (VA-VB)*3.6;
    pvitesses->cas=5;
    ok=true;
}
if (!ok)
{
    pvitesses->vitesse_f = -1;
    pvitesses->vitesse_crash = -1;
    pvitesses->cas=-1;
    ok=true;
}
}
else
{
    pvitesses->vitesse_f = -1;
    pvitesses->vitesse_crash = -1;
    pvitesses->cas=-1;
    ok=true;
}
}
```

d) Fichier util.h

```
#ifndef _util_h
#define _util_h

float GetVehHeadway (int index, int idsection);
float GetVehSecurityHeadway (int index, int idsection, float tr, int* pcas);
float GetDeceleration (int index, int idsection, VehicleContainer* pvehc, float acicle, float* pm, float* pa);
void ContainerInit (int nbsection, VehicleContainer* pvehc);
void GetVehSpeedCrash (int index, int idsection, float tr, Vitesses* pvitesses);

#endif
```

e) Fichier Vehicle.cxx

```
#pragma warning (disable:4786)
#include "GetExt_common.h"
```

```
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "Vehicle.h"

void VehicleContainer::Reset()
{
    Vehicle *aveh;
    std::map< int, Vehicle *>::iterator iter;
    for( iter = vehs.begin(); iter != vehs.end(); iter++ )
    {
        aveh = (*iter).second;
        delete aveh;
    }
    vehs.clear();
}

void VehicleContainer::Add(int idveh, float dist)
{
    Vehicle *aveh = new Vehicle(idveh, dist);
    vehs.insert( std::map< int, Vehicle *>::value_type(idveh, aveh));
    (*aveh).SetUsed();
}

Vehicle *VehicleContainer::Get(int idveh)
{
    Vehicle *res = NULL;
    std::map< int, Vehicle *>::iterator iter;
    iter = vehs.find( idveh );
    if( iter != vehs.end() )
    {
        res = (*iter).second;
    }
    return res;
}

void VehicleContainer::Remove(int idveh)
{
    Vehicle *res = Get(idveh);
    if (res!=NULL)
    {
        delete res;
    }
    vehs.erase(idveh);
}

Void VehicleContainer::Compress()
{
    std::map< int, Vehicle *>::iterator iter;
    std::map< int, Vehicle *>::iterator iter_old;
    iter = vehs.begin();
    int size = vehs.size();
    while (iter != vehs.end())
    {
        Vehicle *aveh = (*iter).second;
        if (!aveh->IsUsed())
        {
            delete aveh;
            iter_old = iter;
            iter++;
            vehs.erase(iter_old);
        }
    }
}
```

```
    }  
    else  
    {  
        iter++;  
    }  
}  
size = vehs.size();  
}
```

f) Fichier Vehicle.h

```
#pragma warning (disable:4786)  
#ifndef Vehicle_h  
#define Vehicle_h  
#include <map>  
  
class Vehicle  
{  
    private:  
        int id;  
        float previousSpeed;  
        bool used;  
    public:  
        Vehicle(int a, float b){ id = a; previousSpeed = b;};  
        float GetSpeed(){used = true; return previousSpeed;};  
        void SetSpeed(float b){used = false; previousSpeed = b;};  
        void SetUsed(){used = true;};  
        bool IsUsed(){return used;};  
};  
class VehicleContainer  
{  
    private:  
        std::map< int, Vehicle *> vehs;  
    public:  
        int pos;  
        VehicleContainer();  
        ~VehicleContainer();  
  
        void Reset();  
        void Add(int idveh, float dist);  
        void Remove(int idveh);  
        Vehicle *Get(int idveh);  
        void Compress();  
};  
struct Vitesses  
{  
    float vitesse_f;  
    float vitesse_crash;  
    int cas;  
};  
  
#endif
```


10 LISTE DES FIGURES

Figure 1 : L'approche systémique et les possibilités d'actions concrètes pouvant être entreprises au niveau suisse en matière de sécurité routière	1
Figure 2 : Fonctionnement idéal d'un microsimulateur, avec influence des outputs de sécurité sur les outputs de performance pour une évaluation globale du réseau	3
Figure 3 : Approche complémentaire par microsimulation permettant une évaluation de la sécurité	4
Figure 4 : Schéma du couple de véhicule intervenant dans la définition des collisions en file	6
Figure 5 : Illustration de la notion de Time to collision par la trajectoire des véhicules [27]	6
Figure 6 : Détermination de S et de ΔS dans le cas d'une hypothétique collision entre deux véhicules se suivant	12
Figure 7 : Schématisation de la démarche de calcul de la densité d'insécurité à partir d'un microsimulateur	14
Figure 8 : Schématisation du réseau pris en compte dans l'étude de cas	17
Figure 9 : Répartition kilométrique des accidents en file (année 2001) sur la chaussée Sud de l'autoroute Genève – Lausanne pour définir la zone d'étude	19
Figure 10 : Distribution temporelle des accidents en file (somme des années 2001, 2002 et 2003) par portion kilométrique de 500 mètres.	20
Figure 11 : Distribution temporelle des accidents en file (somme des années 2001, 2002 et 2003) par portions kilométriques de 1000 mètres	20
Figure 12 : Distribution des accidents en file (somme des années 2001, 2002 et 2003) par portion kilométrique de 500 mètres	21
Figure 13 : Relevé des conditions de trafic sur l'autoroute Genève – Lausanne, le mardi 15 octobre 2002 (compteur de Denges, direction Lausanne) [Source : http://verkehr.cnlab.ch/verkehr1/]	21
Figure 14 : Paramètre R_d moyen : indicateur de la probabilité d'une hypothétique collision	23
Figure 15 : Evolution du paramètre S_{moyen}	23
Figure 16 : Evolution du paramètre ΔS_{moyen}	24
Figure 17 : Evolution du paramètre UD moyen	25

Figure 18 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 1000 mètres : moyenne \pm écart-type sur 50 réplifications	27
Figure 19 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 500 mètres : moyenne et écart-type sur 50 réplifications	27
Figure 20 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 100 mètres : moyenne et écart-type sur 50 réplifications	28
Figure 21 : Valeurs du paramètre d'insécurité obtenues par portion kilométrique de 1000 mètres sur un échantillonnage de 50 réplifications	29
Figure 22 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 1000 mètres : moyenne \pm 2 écarts-type sur 46 réplifications (échantillonnage purgé de 50 réplifications)	31
Figure 23 : Evolution de la densité d'insécurité par portion kilométrique de 500 mètres : moyenne \pm 2 écarts-types sur 46 réplifications (échantillonnage purgé de 50 réplifications)	32
Figure 24 : Evolution de la densité d'insécurité et des statistiques d'accidents en file par portion kilométrique de 1000 mètres : moyenne \pm écart-type	33
Figure 25 : Evolution de la densité d'insécurité et des statistiques d'accidents en file par portion kilométrique de 500 mètres : moyenne \pm écart-type	34
Figure 26 : Comparaison entre la densité d'insécurité et les statistiques d'accidents en file par portion kilométrique de 100 mètres	34
Figure 27 : Comparaison entre la densité d'insécurité, la densité moyenne d'accidents et la densité critique d'accidents (années 2001, 2002 et 2003)	36
Figure 28 : Localisation du senseur de la jonction Morges-Est servant à la calibration	42
Figure 29 : Répartition temporelle des accidents en file recensés dans les rapports de police durant les années 2001, 2002 et 2003	43
Figure 30 : Prise en compte du comportement du conducteur dans la microsimulation pour la détermination de la dangerosité d'un réseau	45

11 LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Variabilité des valeurs de la densité d'insécurité sur 15 répliques, par portion kilométrique de 1000 mètres.....	25
Tableau 2 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue après 50 répliques pour des tronçons d'analyse de 1000 mètres	26
Tableau 3 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue après 50 répliques pour des tronçons d'analyse de 500 mètres	28
Tableau 4 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue avec 46 répliques (4 purgées sur 50 réalisées) pour des tronçons d'analyse de 1000 mètres	30
Tableau 5 : Analyse statistique de la densité d'insécurité kilométrique obtenue avec 46 répliques (4 purgées sur 50 réalisées) pour des tronçons d'analyse de 500 mètres	30

12 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bon nombre d'ouvrages littéraires ont influencé de près ou de loin ce rapport. Les parties d'ouvrages directement reprises (texte et/ou images intégrées sans modifications) sont référencées dans le texte avec un chiffre entre crochets. Les autres sources citées répondent à un besoin de documentation générale autour du sujet de l'évaluation de la sécurité routière et des outils de microsimulation.

- [1] ARCHER J., «*Developing the potential of micro-simulation modelling for traffic safety assessment*», Proceedings of the 13th Annual International Cooperation on Theories and Concepts on Traffic Safety Workshop, Corfu, 2000
- [2] ARCHER J., «*Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling – A study of urban and suburban intersections*», Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005
- [3] ATEC - Association pour le développement des techniques de transport d'environnement et de circulation, «*Sécurité routière et télématique*», Rapport du Groupe de projet ITS France – Système de transport Intelligents, Collection ATEC, Paris, avril 2002
- [4] AVERILL M. & KELTON W. D., «*Simulation Modeling and Analysis*», McGraw-Hill International Editions, Second Edition, 1991
- [5] BARCELO J. & CASAS J. & FERRER J. L. & GARCIA D., «*Modeling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The case of AIMSUN*», Traffic and Mobility, Simulation, Economics, Environment, W. Brilon, F. Huber, M. Schreckenberg and H. Wallentowitz Editions, Springer Verlag, 1999
- [6] BARCELO J. & DUMONT A.-G. & MONTERO L. & PERARNAU J. & TORDAY A., «*Safety indicators for microsimulation-based assessments*», Proceedings of the 82nd TRB Annual Meeting, Washington, 2003
- [7] BARCELO J. & FERRER J. L. & GARCIA D. & FLORIAN M. & LE SAUX E., «*Parallelization of Microscopic Traffic simulation for ATT Systems Analyses*», P. Marcotte and S. Nguyen Editions, Equilibrium and Advanced Transportation Modeling, Klumer Academic Publishers, 1998

-
- [8] BARCELO J. & FERRER J. L. & FLORIAN M. & CHABINI I. & LE SAUX E., «*A Route Based variant of the AIMSUN Microsimulation Model*», Proceedings of the 2nd World Congress in Intelligent Transport Systems, Yokohama, 1995
 - [9] BPA – Bureau suisse de prévention des accidents, «*VESIPO – Elaboration des fondements d'une politique nationale de sécurité routière*», Mandat de recherche ASTRA 200/447, Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) – Office fédéral des routes (OFROU), Berne, mai 2002
 - [10] BRACKSTONE M. & SULTAN B. & McDONALD M., «*Motorway driver behaviour: studies on car following*», Transportation Research Part F, Elsevier Science Ltd., 2002
 - [11] BÜHLMANN F. & LINDENMAANN H. P. & SPACEK P., «*Sichtweiten, Überprüfen der Grundlagen zur Norm SN 640 090: Projektierungsgrundlagen, Sichtweiten*», VSS – Union suisse des professionnels de la route et des transports, Mandat de recherche VSS 17/84, IVT – Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETHZ, Zurich, 1991
 - [12] DUMONT A.-G. & BAUMANN D. & TORDAY A., «*Impacts d'une limitation technique de la vitesse des motocycles : Analyse par microsimulation de la capacité, des temps de parcours et de la sécurité sur autoroute – Rapport d'étude*», TCS – Touring Club Suisse & LAVOC – Laboratoire des voies de circulation, EPFL, novembre 2002
 - [13] FAZIO J. et al., «*Use of freeway conflict rates as an alternative to crash rates in waving section safety analyses*», TRR – Transportation Research Record, Vol. 1401, 1995
 - [14] FITZPATRICK K. ET AL., «*Accident mitigation guide for congested rural two-lane highways*», NCHRP – National Cooperative Highway Research Program, Report 440, National Academy Press, Washington, D.C., 2000
 - [15] GABBARD J. F., «*Car-Following Models*», M. Papageorgiou Edition, Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems, Pergamon Press, Oxford, 1991
 - [16] GERLOUGH D. L. & HUBER M. J., «*Traffic Flow Theory – A Monograph*», TRB – Transportation Research Board, Special Report 165, Chapter 6, National Research Council, Washington, D. C., 1975
 - [17] GIPPS P. G., «*A behavioural car-following model for computer simulation*», TRB – Transportation Research Board, Vol. 15, National Research Council, Washington, D. C., 1981, pp. 105-111
 - [18] GREIBE P., «*Accident prediction models for urban roads*», Accident Analysis and Prevention, Vol. 839, Elsevier Science Ltd., 2002, pp.1-13
 - [19] GTS – Gardner Transportation Systems, «*Surrogate Assessment Methodology*», Siemens Energy and Automation, Inc., submitted to Federal Highway Administration, Office of Safety Research and Development, 2002
 - [20] HAMERSLAG R. & ROSS J. P. & KWAKERNAAK M., «*Analysis of Accidents in Traffic Situations by Means of Multiproportional Weight Poisson Model*», TRB – Transportation Research Board, Record 847, National Research Council, Washington, D. C., 1982, pp. 29-36
 - [21] HANCOCK P. A., «*Is car following the real question – are equations the answer?*», Transportation Research Part F 2, IAAP – International Association of Applied Psychology, Elsevier Science Ltd., 1999, pp. 197-199
-

-
- [22] HUGUENIN F. & DUMONT A.-G., «*Evaluation of traffic safety using microsimulation*», STRC – Swiss Transport Research Conference, Monte Verità, 2005
 - [23] KAUB A., «*Highway corridor safety levels of service based on annual risk of injury*», 79th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 2000
 - [24] KOSONEN I & REE S., «*The Potential of Microscopic Simulation in Traffic Safety and Conflict Studies*», Traffic Safety on Three continents Conference, Pretoria, South Africa, 2000
 - [25] LECHNER D., «*La reconstitution cinématique des accidents*», Rapport INRETS n°21, INRETS – Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, Arcueil Cedex, décembre 1986
 - [26] MAHUT M., «*Behavioural Car Following Models*», Ph. D. Thesis, Chapter 3, CRT – Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, 2000
 - [27] MINDERHOUD M. M. & BOVY P. H. L., «*Extended time-to-collision safety measures for road traffic safety assessment*», Accident Analysis and Prevention, Vol. 33, Issue 1, Elsevier Science Ltd., 2001, pp. 89-97
 - [28] MONTERO L. & BARCELO J. & PERARNAU J., «*Incident Prediction: A Statistical Approach for Probability Estimation – Application to a test Site in Barcelona*», submitted for publication in Transportation Research Series C, May 2002
 - [29] MUSSINE L. & FERRARI A. & ONETA M., «*An analysis of urban collisions using an artificial intelligence model*», Accident Analysis and Prevention, Vol. 31, Elsevier Science Ltd., 1999, pp. 705-718
 - [30] OMS – Organisation mondiale de la Santé & Banque Mondiale, «*Rapport mondial sur la prévention des traumatismes dus aux accidents de la circulation*», Genève, 2004
 - [31] PANWAI S. & HUSSEIN D., «*Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behaviour*», Workshop on Traffic Simulation, Intelligent Transport Systems Research Laboratory, University of Queensland, Brisbane, August 2004
 - [32] PERSAUD B. & MUCSI K., «*Microscopic accident potential models for two-lane rural roads*», TRR – Transportation Research Record n°1485, 1995, pp. 134-139
 - [33] RAJAGOPAL A., «*Implementation of AIMSUN in the PAPABILES project*», Civil Engineering Department, Indian Institute of Technology, Bombay, 2001
 - [34] TAKASHIMA K. & KOIKE H. & MORIMOTO A., «*Analysis about the Potential Risk of Accident at an Intersection from the Viewpoint of Traffic Characteristic*», Journal of Japan Society of Civil Engineers, n°716, IV-57, 2002, pp. 39-52
 - [35] TORDAX A. & BAUMANN D. & DUMONT A.-G., «*Road Safety Assessment Using Microsimulation-Based Indicators*», 10th ITS World Congress, Madrid, 2003
 - [36] TORDAY A. & BIERLAIRE M., «*PAPABILES – Projet autoroutier pilote Aubonne-Belmont pour une initiative lausannoise d'évaluation par simulation – Phase I : étude préliminaire*», LAVOC – Laboratoire des voies de circulation, EPFL, Lausanne, 2000
 - [37] TORDAY A. & BIERLAIRE M. & BAUMANN D., «*PAPABILES - Projet autoroutier pilote Aubonne-Belmont pour une initiative lausannoise d'évaluation par simulation – Phase II : 3^{ème} voie et contrôle d'accès*», LAVOC – Laboratoire des voies de circulation, EPFL, Lausanne, 2002
 - [38] TORDAY A. & DUMONT A.-G., «*Safety indicator for microsimulation-based assessments*», LAVOC – Laboratoire des voies de circulation, EPFL, Lausanne, 2002
-

-
- [39] TORDAY A. & DUMONT A.-G., «*Simulation of accidents and congestion on a periurban network: safety analysis*», Proceedings of the Safe Highways for the Future 2002 Conference, Cologne, 2002
 - [40] TOURAN A. & BRACKSTONE M. A. & MCDONALD M., «*A collision model for safety evaluation of autonomous intelligent cruise control*», Accident Analysis and Prevention 31, Elsevier Science Ltd., 1999, pp. 567-578
 - [41] TSS – Transport Simulation Systems, «*GETRAM – Open Traffic Simulation Environment : AIMSUN Version 4.2, User Manual*», February 2004
 - [42] TSS – Transport Simulation Systems, «*GETRAM – Open Traffic Simulation Environment : GETRAM Extension Version 4.2, User's Manual*», February 2004
 - [43] TSS – Transport Simulation Systems, «*GETRAM – Open Traffic Simulation Environment : TEDI Version 4.2, User Manual*», February 2004
 - [44] UNO N. & IIDA Y. & YASUHARA S. & SUGANUMA M., «*Objective Analysis of Traffic Conflict and Modeling of Vehicular Speed Adjustment at Weaving Section*», Journal of Infrastructure Planning, Vol. 4, n°4, 2003, pp. 989-996
 - [45] U.S. DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, «*IDAS – ITS Deployment Analysis System*», User's Manual, Federal Highway Administration, Cambridge Systematics Inc., February 2004
 - [46] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, «*Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models: Final Report*», Publication n°FHWA-RD-03-050, Federal Highway Administration, Office of Safety Research and Development, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, McLean, Virginia 22101, 2003
 - [47] VOGEL K., «*A comparison of headway and time to collision as safety indicators*», Swedish National Road and Transport Research Institute, 2002
 - [48] VSS – Association suisse des professionnels de la route et des transports, «*SN 640 009 - Accidents de la circulation : Localisation et classement des accidents (points noirs)*», Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich, 1998
 - [49] WAKABAYASHI et al., «*Traffic Conflict Analysis using Vehicle Tracking System: Digital VCR and Proposal of a New Conflict Indicator*», Journal of Infrastructure Planning, Vol. 20, n°4, 2003, pp. 949-956